INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa

Análise e Dimensionamento de Sistemas Estruturais de Vidro

José Maria Cardoso Pinto de Noronha Sanches

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Júri:

Presidente: Prof. Doutor José Manuel Matos Noronha da Câmara

Orientador: Prof. Doutor João Sérgio Nobre Duarte Cruz

Vogal: Prof. Doutor Fernando António Baptista Branco

Janeiro 2013

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado sob a orientação do Professor Sérgio Cruz, a quem me cabe exprimir sincero agradecimento e reconhecimento pela oportunidade que me foi concedida e especialmente por todo o apoio prestado ao longo destes últimos meses ao qual espero ter correspondido devidamente.

À empresa SJ Software Gmbh pela disponibilização do software SJ Mepla 3.5, que se revelou fundamental na execução deste projecto.

Ao Sr. Carlos Bigode por toda a informação e conhecimento partilhado, que em muito contribuiu para o desenvolvimento desta dissertação.

Ao Samuel e à Mafalda pela revisão do texto.

Aos professores e pessoal auxiliar que diariamente contribuem para o prestígio da instituição.

Finalmente, um especial agradecimento a toda a família e a todos os amigos que das mais diversas formas deram o seu indispensável contributo para a realização deste trabalho e a conclusão desta etapa.

Resumo

A utilização do vidro como material de construção vem de há muito tempo, mas é nas últimas décadas que a sua utilização conhece novas funções e novos desafios. Nos últimos anos tem-se registado um aumento da procura do vidro para fins arquitectónicos reflectindo-se também na sua aplicação estrutural, como é o caso de fachadas autoportantes (painéis e vigas - *glass fins*), pavimentos ou guarda-corpos. Contudo, o vidro apresenta um conjunto de características mecânicas que do ponto de vista estrutural oferecem algumas limitações que devem ser devidamente acauteladas, sendo a mais importante o caso da fragilidade. Neste trabalho são estudados três casos práticos onde a utilização do vidro é frequente.

Primeiro é dimensionada uma fachada autoportante de vidro com 15 metros de altura composta por vidro duplo simplesmente apoiados em vigas - *glass fins*. Uma vez que não é possível fabricar peças contínuas desta dimensão, efectuou-se uma ligação intermédia em cada *glass fin* com recurso a quatro réguas metálicas aparafusadas duas a duas. Como o vidro não é capaz de plastificar, está sujeito a picos de concentração de tensões antes da rotura, foram assim criados modelos de elementos finitos de elevada descretização junto à zona das ligações. Seguiu-se um estudo de optimização da fachada e das *glass fins*, onde os painéis de fachada (em vidro duplo) foram dimensionados de acordo com duas normas distintas, a ASTM E 1300-09 e a NF DTU39, comparando-se posteriormente com os resultados obtidos pelo software SJ MEPLA 3.5. Os painéis de fachada são carregados pela pressão do vento e transmitem as cargas para a *glass fin* e que por sua vez descarrega na estrutura principal do edifício.

No segundo caso foi analisado um pavimento, onde painéis rectangulares foram estudados com base em modelos de elementos finitos (SAP 2000 v14.2 *advanced* e SJ MEPLA 3.5) e de acordo com a ASTM E 2751-11. O sistema estrutural típico é simplesmente apoiado nos quarto bordos, tendo sido determinadas diferentes espessuras para o vidro laminado em função do comprimento do vão e das exigências regulamentares.

Por último, analisou-se o caso típico de um guarda-corpos composto por um vidro laminado aparafusado a uma estrutura metálica. A estrutura comporta-se como uma consola, sujeita à acção do vento em toda a superfície ou a uma sobrecarga linear que actua no bordo superior do painel de vidro. Com recurso ao software SAP2000 v.14.2 procurou-se modelar o comportamento de todo o conjunto, comparando as tensões máximas no vidro com o preconizado na NF DTU 39.

Palavras-chave: *glass fin,* normas internacionais, vidro estrutural, vidro laminado, vidro duplo.

Abstract

The use of glass as a construction material began a long time ago, but only recently glass meets new challenges and applications. The demand of glass for architectural applications has consistently increased in the last few years, with an obvious impact in structural glass, such as self-supporting façades (infill panels and glass fins), floors or balustrades. However, the use of structural glass has some issues that need to be controlled, mainly the brittle behavior. This thesis presents three examples where glass is frequently used as a structural element.

First, a 15 meters height self-supporting glass façade (double glazing) supported by glass fins was designed. Due to the impossibility to produce glass pieces over 11 meters, it was considered an intermediate connection in the fin with four thin plates bolted. As the glass does not have a plastic behavior, these connections are normally subject to high levels of concentrated stresses; therefore a finite element model was created with a tight mesh nearly the connections with SAP2000 v14.2 advanced software. Then, an optimization study took place in order to get the best solution for the panels and the glass fins as well. The design of the insulated glass panels is made according to two different standards, ASTM E 1300-09 and NF DTU39, and compared with SJ MEPLA software results. These panels are designed to carry the wind load and properly transmit it to the fins.

Second, a glass floor was analyzed, where rectangular panels were tested and analyzed with finite element models following the ASTM E 2751. The typical structural system is simply supported on the four edges and several different thicknesses are presented for the laminated glass as a function of the length span and according to standard's requirements; results comparison was made also through SJ MEPLA software.

Finally, a typical glass balustrade is analyzed. The system consists on a laminated glass which is fixed to a steel structure with bolts. The structure behaves as a cantilever, which is subject to wind load or linear load acting on the top edge. A finite element model was created using the SAP2000 v14.2 advanced software, where the maximum tensile stress was controlled according to NF DTU 39.

Keywords: insulated glass, glass fin, international standards, laminated glass, structural glass.

Simbologia

E_v – módulo de elasticidade do vidro

G_v – módulo de distorção do vidro

G – módulo de distorção da película intermédia

ρ – massa volúmica do vidro

α – coeficiente de dilatação linear

σ – tensão

σ_{max} - tensão máxima no vidro

ε – extensão

A - área

δ – deslocamento máximo

L – comprimento do vão

L_1 – comprimento do maior vão de um painel de pavimento

L_2 - comprimento do menor vão de um painel de pavimento

e_{eq} - espessura equivalente utilizada para estimar deformações em vidros laminados

T – temperatura

ΔT - variação de temperatura

W_k - pressão característica do vento

ν - coeficiente de Poisson

PVB - polyvinyl butyral

SGP - *SentryGlasPlus®*

EPDM - ethylene propylene diene rubber

j - largura da junta estrutural

e_j – espessura final da junta estrutural

e_0 - espessura inicial da junta estrutural

d - deslocamento relativo entre o vidro e o substrato

SGG – *SaintGobain Glass*

EN – norma europeia

BS – norma britânica

NF – norma francesa

ASTM – norma americana

t_i - espessura da lâmina de vidro i

e_t – espessura total do envidraçado

e_2 – espessura equivalente para o cálculo da flecha

ε_1 – factor de equivalência para vidros isolantes

ε_2 – factor de equivalência para vidros laminados

f - flecha

Γ – coeficiente de transferência de corte

$h_{ef,w}$ - espessura efectiva para o cálculo de deformações segundo a ASTM E 1300

$h_{ef,\sigma}$ - espessura efectiva para o cálculo de tensões segundo a ASTM E 1300

W_m- vento repartido para o vidro monolítico

W_l - vento repartido para o vidro laminado

σ_m - tensão no vidro monolítico

σ_l - tensão no vidro laminado

Índice

Agradecimentos I
Resumo II
Abstract III
Simbologia IV
1 – Introdução 1
1.1 – Enquadramento geral 1
1.2 – Objectivos e metodologia 3
1.3 – Organização da dissertação 4
2 – Descrição do vidro 5
2.1 – Nota introdutória 5
2.2 – Processo de fabrico 6
2.3 – Tipos de vidros 7
2.3.1 - Introdução 7
2.3.2 – Vidro recozido 9
2.3.3 – Vidro temperado 9
2.3.4 – Vidro termoendurecido 9
2.3.5 – Vidro laminado 10
2.3.6 – Vidros tecnológicos 13
2.4 – Defeitos 14
3 - Análise de estruturas de vidro 17
3.1 - Nota introdutória 17
3.2 – Acções directas 17
3.2.1 – Peso próprio 17
3.2.2 – Vento 18
3.2.3 – Neve 18
3.2.4 – Sobrecargas em edifícios 18
3.3 – Deformações impostas 19
3.4 – Sistemas de conexão 21
3.4.1 – Introdução 21
3.4.2 – Fixações mecânicas 21
3.4.3 – Silicone estrutural 26
3.5 – Exigências funcionais 28
3.5.1 – Exigências térmicas 28

3.5.2 – Exigências acústicas 31
3.5.3 – Segurança 34
3.5.4 – Segurança contra incêndios 36
4 – Exemplos práticos 39
4.1 – Fachada suportada por *Glass fins* 39
4.1.1- Nota introdutória 39
4.1.2 – Escolha de materiais 41
4.1.3 – Número de parafusos na emenda 43
4.1.4 – Zona da emenda, relação *a/L* 44
4.1.5 – Afastamento entre *Glass fins* 45
4.2 – Painel de fachada – Vidros duplos 49
4.2.1 – Nota introdutória 49
4.2.2 – Dimensionamento com base na ASTM E 1300-09a 52
4.2.3 – Dimensionamento com base na NF DTU 39 56
4.2.4 – Discussão dos resultados 59
4.3 – Pavimento 61
4.3.1 – Nota introdutória 61
4.3.2 – Escolha de materiais 62
4.3.3 - Dimensionamento do pavimento 64
4.3.4 – Discussão de resultados 65
4.4 – Guarda-corpos 67
4.4.1 – Nota introdutória 67
4.4.2 – Escolha de materiais 68
4.4.3 – Dimensionamento da guarda 68
5 – Conclusões e perspectivas de desenvolvimentos futuros 73
5.1 – Conclusões 73
5.2 – Perspectivas de desenvolvimentos futuros 76
6 – Bibliografia 79
Anexo I – Justificação do valor adoptado para a pressão do vento – EN1991-1-4 84
Anexo II – Normas para a geometria dos furos em vidros temperados e termoendurecidos. 86
Anexo III – *Glass fin* – Resultados computacionais 87
Anexo IV – Painel de fachada, resultados MEPLA 93
Anexo V – Pavimentos 94
Anexo VI – Fichas técnicas de materiais 96

Índice de figuras

Figura 1 – Fachada de vidro suportada por *glass fins,* Ópera de Oslo (1). 2
Figura 2 – Escadas de vidro, Apple Store em Hamburgo (2). 2
Figura 3 – Cobertura de vidro suportada por glass fins em consola (Tóquio) (3). 2
Figura 4 – Etapas do processo de fabrico float (adaptado de (32)). 7
Figura 5 - Efeitos do processo de têmpera térmica (adaptado de (5)). 7
Figura 6 – Relação tensão resistente/dimensão da imperfeição (adaptado de (5)). 8
Figura 7 - Padrão de fendilhação do vidro recozido, termoendurecido e temperado (adaptado de (19)). 9
Figura 8 - Relação entre o tamanho do fragmento, o comportamento estrutural e o desempenho pós-rotura (adaptado de (4)). 10
Figura 9 - Mecanismo de rotura de um vidro laminado (adaptado de (5)). 10
Figura 10 - a) G muito elevado, comportamento monolítico. b) G muito reduzido, escorregamento. . 11
Figura 11 - Análise comparativa de vigas coladas com PVB vs SGP (P/d) (adaptado de (6)). 12
Figura 12 - Efeito da temperatura no módulo de elasticidade das películas de SGP e PVB (adaptado de (6). 12
Figura 13 - Viaduto com barreira acústica composta por *BIOCLEAN*® (13). 13
Figura 14 – Vidro inteligente. Modo transparente e modo opaco (adaptado de (31). 14
Figura 15 - Esquema de funcionamento de um vidro inteligente (adaptado de (31)). 14
Figura 16 - Heat soaked test - Esquema de funcionamento do ensaio (EN 14179). 15
Figura 17 - Tensões de origem térmica devido ao ensombramento do caixilho. 20
Figura 18 – Fachada em vidro agrafado, Instituto Superior Técnico, Campus Tagus Park. 22
Figura 19 - "Aranha" (adaptado de (47)). 22
Figura 20 - Preenchimento da folga em ligações aparafusadas (adaptado (37)). 22
Figura 21 - Sistemas de fixação para vidro agrafado (adaptado de (13)). 22
Figura 22 - Guarda corpos com recurso a vidro fixado por grampos metálicos (Montanha Tianmen, China (54)). 24
Figura 23 - Grampo metálico (50). 24
Figura 24 - *Glass fin* com fixação por aperto-fricção, Austrália (53). 24
Figura 25 - Esquema de fixação (adaptado de (4)). 24
Figura 26 - Tensões de contacto entre vidro e parafuso. 25
Figura 27 - Vão envidraçado, caixilharia de madeira, Londres (2). 26
Figura 28 - Painel apoiado em silicone estrutural em dois bordos (adaptado de (10)). 27
Figura 29 - Painel apoiado em silicone estrutural em todos os bordos (adaptado de (10)). 27
Figura 30 - Movimento térmicos, junta estrutural. 28
Figura 31 - Espectro do raio solar, EN 410. 30
Figura 32 - Vidros de controlo solar (adaptado de (24)). 31
Figura 33 - Perturbação da pressão do ar devido a uma onda sonora (12). 32

Figura 34 - Decomposição da energia sonora incidente (12)). 33
Figura 35 - Relação da massa do material com a redução sonora (12). 34
Figura 36 - Ensaio de resistência ao impacto segundo a EN 12600. 34
Figura 37 - Entrada principal com fachada suportada por *glass fins*, Apple Store em Nova Iorque (2). 39
Figura 38 - *Glass fin*, Fundação Champalimaud, Lisboa. 40
Figura 39 – Pormenor da emenda, Fundação Champalimaud. 40
Figura 40 - Caso de Estudo 1 - Fachada suportada por *glass fins*. 40
Figura 41 - Pormenor da ligação de topo. 41
Figura 42 - Pormenor da ligação intermédia. 41
Figura 43 - Gráfico carga/deslocamento de vigas laminadas coladas com PVB e SGP. 42
Figura 44 - Tensões na emenda devido às cargas actuantes. 42
Figura 45 - Simulação do comportamento da solução com silicone $\boldsymbol{\sigma max = 41,8\ MPa}$ 43
Figura 46 - Simulação do comportamento da solução tradicional $\boldsymbol{\sigma max = 57,4\ MPa}$. 43
Figura 49 - Evolução da tensão máxima no bordo do furo condicionante face à variação da relação a/L. 44
Figura 50 - *Glass fin* - modelo estrutural. 44
Figura 47 - Pormenor da emenda (meia-régua). 44
Figura 48 - Gráfico tensão máxima no vidro/número de parafusos. 44
Figura 51 - Gráfico tensão máxima no vidro/afastamento entre *glass fins.* 46
Figura 52 - 1ºModo de encurvadura - Solução A, B e C. 47
Figura 53 - Encurvadura lateral. I - Pressão; II - Sucção. 47
Figura 54 - Corte no parafuso. 48
Figura 55 - Tensão de comparação nas réguas metálicas ($\boldsymbol{\sigma comp = 206\ MPa}$) 49
Figura 56 - Tensão de comparação na chapa do apoio superior ($\boldsymbol{\sigma comp = 23,8\ MPa}$). 49
Figura 57 - Deformada de um vidro duplo carregado perpendicularmente ao plano. 50
Figura 58 - Modelo de comportamento de um gás perfeito. 51
Figura 59 - Modelo de comportamento de um vidro duplo. 51
Figura 60 - Modelo estrutural do painel de fachada. 52
Figura 61 - Corte AA' do painel de fachada. Secção transversal. 52
Figura 62 - Pormenor do tipo da ligação do painel à *glass fin* (28). 52
Figura 63 - Gráfico tensão máxima no vidro laminado/espessura do vidro laminado 60
Figura 64 - Gráfico da tensão máxima no vidro tmonolítico/espessura do vidro. 61
Figura 65 - Caso de Estudo 2 - Planta do pavimento. 62
Figura 66 - Caso de Estudo 2 - Corte transversal BB'. 62
Figura 67 - *Grand Canyon Skywalk* (Estados Unidos) (9) 62
Figura 68 - Passadiço na Basílica de Aquileia (Itália) (38). 63
Figura 69 - Pormenor da descarga eléctrica para um pavimento de vidro. 64
Figura 70 - Gráfico tensão máxima/espessura do pavimento, $\boldsymbol{Lp1 = 750\ mm}$ e $\boldsymbol{Lp2 = 1500\ mm}$... 66
Figura 71 - Guarda-corpos em vidro (52). 67

Figura 72 - Caso de Estudo 3 - Guarda-corpos. 68
Figura 73 - Diagrama de tensão máxima no vidro ($\boldsymbol{\sigma max = 31,9\ MPa}$). 69
Figura 74 - Deformada. 69
Figura 75 - Tensão de comparação na chapa em L ($\boldsymbol{\sigma comp = 214\ MPa}$). 69
Figura 76 - Tensão de comparação na chapa principal ($\boldsymbol{\sigma comp = 333\ MPa}$). 69
Figura 77 - Tensão de comparação nas chapas de reforço ($\boldsymbol{\sigma comp = 175\ MPa}$). 69

Figura A 1 - Distância mínima do furo ao bordo. 86
Figura A 2 - Distância mínima entre furos. 86
Figura A 3 - Distância minima de um furo a um canto. 86
Figura A 4 - *Glass fin* - Modelo SAP. 87
Figura A 5 - Modelo I 87
Figura A 6 - Modelo II 87
Figura A 9 - Modelo V 88
Figura A 7 - Modelo III 88
Figura A 8 - Modelo IV 88
Figura A 10 – 11m + 4m 89
Figura A 11 - 10,6m + 4,4m 89
Figura A 12 - 10,2m + 4,8m 89
Figura A 13 - 9,8m + 5,2m 89
Figura A 14 - 9,4m + 5,6m 89
Figura A 15 - 9m + 6m 89
Figura A 16 - 8,6m + 6,4m 90
Figura A 17 - 8,2m + 6,8m 90
Figura A 18 - 7,5m + 7,5m 90
Figura A 19 - Tensão máxima, solução A. 91
Figura A 20 - Tensão máxima, solução B. 91
Figura A 21 - Tensão máxima, solução C. 91
Figura A 22 - Ligação do parafuso à glass fin - Modelo SAP 92

Índice de tabelas

Tabela 1 – Composição química dos vidros sílica-soda-cálcio (SLSG) e borosilicatados (BSG) (adaptado de (4)). 5
Tabela 2 – Análise qualitativa do desempenho do vidro face aos agentes externos mais comuns. + resistente, 0 razoável, - sensível (adaptado de (4)). 6
Tabela 3 - Tensões de tracção admissíveis no vidro [MPa]. 8
Tabela 4 – Propriedades físicas das películas de PVB e de SGP (adaptado de (6)). 12
Tabela 5 – Amplitudes térmicas admissíveis no vidro (adaptado de (4)). 21

Tabela 6 – Coeficiente de transmissão térmica de: vidro monolítico de 6 mm, vidro laminado de 2x6 e vidro duplo de dois panos de 6 mm e caixa-de-ar de 12 mm. 29
Tabela 7 – Níveis de pressão sonora característicos de actividades correntes (adaptado de (12)). ... 33
Tabela 8 - Classificação do ensaio de resitência ao impacto segundo a EN12600. 35
Tabela 9 - Classificação do vidro contra o ataque manual, vandalismo e intrusão segundo a EN 356. 35
Tabela 10 - Classificação da resistência do vidro ao ensaio de explosão segundo a EN 13541..... 36
Tabela 11 - Categorias e exigências de resistência ao fogo segundo a EN 13501. 37
Tabela 12 - Deformação máxima das *glass fins.* 46
Tabela 13 - Verificação de segurança à encurvadura lateral..... 46
Tabela 14 - Tensões admissíveis para cargas de curta duração (3seg). ASTM E 1300-09a [MPa].... 54
Tabela 15 - Resultados para o paínel A. 54
Tabela 16 - Resultados para o paínel B. 54
Tabela 17 - Resultados para o paínel C. 55
Tabela 18 - Comparação com os resultados obtidos pelo MEPLA para a solução A. 60
Tabela 19 - Tensão máxima admissível em pavimentos, ASTM E 2751-11. 64
Tabela 20 - Resultados SAP/ASTM , $\boldsymbol{Lp2 = 750\ mm}$. 65
Tabela 21 - Resultados SAP/ASTM, $\boldsymbol{Lp2 = 1250\ mm}$. 65
Tabela 22 - Soluções para o pavimentos, vidro termoendurecido e recozido. 65
Tabela 23 - Resultados MEPLA, $\boldsymbol{Lp2 = 750\ mm}$. 66
Tabela 24 - Resultados MEPLA, $\boldsymbol{Lp2 = 1250\ mm}$. 66
Tabela 25 - Tabela de erros relativos entre SAP e MEPLA, para $\boldsymbol{Lp2 = 750\ mm}$. 66

Tabela A 1 - Tolerâncias adimensionais 86
Tabela A 2 – Resultados MEPLA para a solução A. 93
Tabela A 3 - Resultados MEPLA para a solução B. 93
Tabela A 4 - Resultados MEPLA para a solução C. 93
Tabela A 5 - Resultados SAP para $\boldsymbol{Lp2 = 750\ mm}$. 94
Tabela A 6 - Resultados SAP para $\boldsymbol{Lp2 = 1250\ mm}$. 94
Tabela A 7 - Resultados MEPLA para $\boldsymbol{Lp2 = 750\ mm}$. 94
Tabela A 8 - Resultados MEPLA para $\boldsymbol{Lp2 = 1250\ mm}$. 94
Tabela A 9 - Erros relativos para $\boldsymbol{Lp2 = 750\ mm}$. 95
Tabela A 10 - Erros relativos para $\boldsymbol{Lp2 = 1250\ mm}$. 95

1 – Introdução

1.1 – Enquadramento geral

O vidro é um material com milhares de anos de história e por isso torna-se impossível datar com exactidão o início da sua fabricação. Existem diversas teorias que procuram explicar o seu aparecimento e todas têm em comum o facto de que o vidro começou a ser produzido alguns milhares de anos antes de Cristo. A história do vidro conheceu diversas técnicas de produção, desde os métodos gravíticos, passando pela técnica do sopro até chegar ao procedimento mais utilizado nos dias de hoje: *o float*. Esta nova técnica, desenvolvida em meados do século XX por *Sir Allastair Pilkington*, permite fabricar vidro plano a baixo custo e por isso, assistiu-se a uma revolução na utilização do vidro no mercado da construção. Até então, devido ao seu elevado custo de produção, apenas era acessível a uma pequena franja da população, estando destinado a pequenos vãos envidraçados e a alguns objectos domésticos.

Vivemos actualmente numa sociedade cada vez mais preocupada com questões ambientais e económicas, que procura rentabilizar todos os recursos disponíveis ao seu alcance. Os novos conceitos arquitectónicos não fogem à regra, tendo encontrado no vidro a resposta a muitos dos desafios associados à construção sustentável. De todos os materiais utilizados na construção, poucos têm a particularidade de serem transparentes e como não existe actualmente qualquer habitação que seja projectada sem que haja suficiente luz natural, o vidro torna-se assim num marco claro da arquitectura contemporânea.

O vidro há muito que deixou de ser utilizado exclusivamente em janelas, e como símbolo dos tempos modernos é cada vez mais corrente ver-se outras aplicações que antigamente seriam impensáveis. Hoje, é cada vez mais comum a utilização de vidro em pavimentos, coberturas, escadas, guarda-corpos, paredes divisórias e estruturas de suporte de fachadas (Figura 1 a Figura 3)

A concepção de estruturas de vidro enfrenta um grande desafio e que passa pela sensibilização daqueles que o projectam para a fragilidade do material. Em engenharia, ser frágil não é sinónimo de ser fraco ou pouco resistente, mas sim incapaz de plastificar. O vidro possui um comportamento muito próximo do perfeitamente elástico, isto é, existe uma relação linear entre a tensão e a deformação até que se atinge o limite máximo e o vidro rompe sem aviso, estilhaçando.

Figura 1 – Fachada de vidro suportada por *glass fins*, Ópera de Oslo (1).

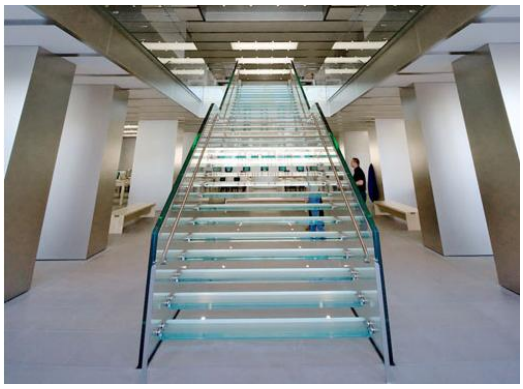


Figura 2 – Escadas de vidro, Apple Store em Hamburgo (2).

Figura 3 – Cobertura de vidro suportada por glass fins em consola (Tóquio) (3).

A falta de ductilidade é um sinal de insegurança e de risco de ferimentos em caso de rotura, tendo sido a razão pela qual o vidro tenha sido relegado, até à relativamente pouco tempo, para aplicações menos exigentes e de carácter não estrutural. Esta lacuna é actualmente vencida, em parte, pela utilização de vidro laminado, isto é, dois ou mais vidro colados com películas compostas por polímeros e que em caso de rotura evita o estilhaço, faz com que os vidros permaneçam no seu lugar oferecendo uma resistência residual, diminuindo largamente o risco de ferimentos.

A crescente procura do vidro, levou a que muitos países iniciassem longos projectos de investigação de modo a que fosse possível regulamentar o uso do mesmo. Na Europa, onde existe uma grande tradição do uso do vidro, existem já alguns países onde o uso do vidro estrutural é regulamentado em parte, como por exemplo, a França, a Alemanha e alguns países nórdicos. Também na América do Norte existe regulamentação específica, quer para os Estados Unidos como para o Canadá. Em Portugal, não existe actualmente nenhuma informação a este respeito, obrigando todos aqueles que pretendem utilizar vidro estrutural a consultar normas estrangeiras. A grande variabilidade da capacidade resistente do vidro e das suas variáveis reflecte-se na grande diversidade de informação entre as diferentes normas, obrigando a que o uso das mesmas seja feito de uma forma cuidada, não se devendo misturar diferentes filosofias.

Este projecto pretende ajudar a preencher a lacuna existente na regulamentação portuguesa, demonstrando com base em exemplos reais como dimensionar alguns tipos de estruturas de vidro, dotando o leitor de sensibilidade para os diversos problemas e também do enorme caminho que pode

e deverá ser percorrido no sentido de melhorar e potenciar todas as capacidades do vidro como material de construção.

1.2 – Objectivos e metodologia

Esta dissertação tem como principal objectivo a análise e dimensionamento de sistemas estruturais de vidro. Pretende-se que o leitor seja capaz de entender de uma forma clara quais as principais condicionantes num projecto de estruturas de vidro e como incluir essas condicionantes na análise global do problema. Ao longo deste documento serão analisados quatro tipos de situações que, por serem as mais correntes cobrem grande parte da aplicação do vidro estrutural, são elas:

1. Fachada com painéis de vidro duplo suportada por *glass fins;*
2. Painel de fachada em vidro duplo, simplesmente apoiado em dois bordos;
3. Pavimento em vidro, simplesmente apoiado em quatro bordos;
4. Guarda-corpos.

As *glass fins* são vigas em vidro laminado de reduzida espessura, utilizadas frequentemente para suporte de coberturas e fachadas em vidro. Neste trabalho será dimensionada uma *glass fin* tipo de uma fachada com 15 metros de altura, onde se procurará explicar e integrar as principais variáveis mediante a utilização de modelos de elementos finitos. A complexidade da análise está associada às zonas de ligação, especialmente na emenda que será feita (consequência da limitação existente para a produção de vidros com dimensões superiores a 11 metros), dada a natureza do material. Serão também testados vários modelos com o intuito de optimizar a secção transversal de uma viga em função da máxima área de influência que é capaz de suportar.

A análise estrutural de um vidro duplo é feita de uma forma distinta de um vidro simples, devido à existência de caixa-de-ar no seu interior. É também objectivo deste projecto ajudar o leitor a compreender a mecânica do problema e os princípios que estão por trás dos métodos mais utilizados no dimensionamento deste tipo de soluções.

A análise de pavimentos em vidro é igualmente parte integrante desta dissertação. O vidro é um material que quando projectado para resistir a cargas permanentes, a sua capacidade resistente diminui significativamente, não só pelo fenómeno de "*stress corrosion*" (ver página 8) que afecta o vidro em si, mas também devido ao comportamento viscoelástico característico das películas de PVB. Descrever-se-ão as etapas necessárias para o cálculo da espessura de um determinado pavimento em função dos vãos pretendidos.

Por fim, é analisado um caso real de um guarda corpos colocado numa varanda. O sistema consiste num painel de vidro laminado aparafusado a duas chapas metálicas, que por sua vez estão fixas à laje de betão. Neste caso, é construído um modelo de elementos finitos de modo a controlar as tensões nos bordos de furação e nas chapas metálicas.

1.3 – Organização da dissertação

Para além do presente capitulo, serão ainda abordados mais quatro (excluindo evidentemente os capítulos destinados às referências bibliográficas e aos anexos).

O segundo capítulo destina-se a apresentar as principais características do vidro como material. Serão apresentadas as suas características mecânicas de uma forma vocacionada para aquele que é o objectivo principal deste trabalho, o vidro estrutural. Parte deste capítulo debruçar-se-á sobre o trajecto do vidro na construção, desde da sua fabricação até à sua utilização em obra. De salientar que neste capítulo serão ainda descritos os diferentes tipos de vidros utilizados para fim estrutural sem esquecer o trabalho notável que têm vindo a ser desenvolvido na área dos vidros tecnológicos e que promete vir a revolucionar a utilização do vidro na construção.

O capítulo três, abordará as principais problemáticas que devem ser tidas em consideração na concepção de sistemas estruturais de vidro. Questões como o vidro de segurança, a térmica e a acústica, que acabam por ter um papel preponderante no cálculo estrutural, serão também alvo de estudo.

No quarto capítulo serão analisados os casos referidos anteriormente, apresentando-se os resultados obtidos computacionalmente ou analiticamente sempre que se revele pertinente. Discutir-se-ão os resultados obtidos e as consequências que daí possam surgir.

Por fim, o quinto capítulo destina-se a compilar as conclusões que vão sendo retiradas ao longo do trabalho. Apresentar-se-ão eventuais limitações relativamente aos resultados obtidos e por último apontar-se-ão algumas sugestões a eventuais projectos que se possam vir a desenvolver no seguimento deste.

2 – Descrição do vidro

2.1 – Nota introdutória

O vidro é um material inorgânico obtido por fusão de diversas matérias-primas e que posteriormente é arrefecido sem permitir a cristalização dos seus minerais, apresentando uma estrutura molecular amorfa. Os vidros mais utilizados na construção são os compostos por soda, sílica e óxido de cálcio e os borosilicatados. A sílica tem a função de vitrificante e possui uma temperatura de fusão bastante elevada, pelo que se adiciona soda como fundente e o óxido de cálcio como estabilizante melhorando a resistência química do vidro. Os borosilicatados devido à sua composição rica em sílica, são adequados para utilização sob o efeito de grandes gradientes térmicos.

O vidro comporta-se como um material quase elasticamente perfeito, isto é, deforma-se elasticamente até que atinge o ponto de rotura e quebra, não havendo patamar de cedência como no aço. Não há lugar a deformação permanente e ao ser descarregado o vidro volta à sua posição inicial. Por não ter capacidade de trabalhar em regime plástico, torna-se num material susceptível a altas tensões localizadas.

Como propriedades físicas médias do vidro plano tem-se:

- $E = 70\ GPa$
- $\rho = 2500\ kg/m^3$
- $\nu = 0{,}23$
- $\alpha = 9x10^{-6}$

A composição química de ambos os vidros é resumida na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química dos vidros sílica-soda-cálcio (SLSG) e borosilicatados (BSG) (adaptado de (4)).

Componente	simbolo	SLSG	BSG
Sílica	SiO_2	69-74%	70-87%
Cal	CaO	5-14%	-
Soda	Na_2O	10-16%	0-8%
Óxido de Boro	B_2O_3	-	7-15%
Óxido de Potássio	K_2O	-	0-8%
Magnésio	MgO	0-6%	-
Alumina	Al_2O_3	0-3%	0-8%
Outros		0-5%	0-8%

O vidro é um material com uma excelente resistência química aos principais agentes responsáveis pela degradação dos materiais de construção. A Tabela 2 mostra qualitativamente o desempenho do vidro face a esses agentes.

Tabela 2 – Análise qualitativa do desempenho do vidro face aos agentes externos mais comuns. + resistente, 0 razoável, - sensível (adaptado de (4)).

Agente	Resistência
Ácidos oxidados e não oxidados	+
Ácidos dissolvidos - SiO2	0/-
Sal	+
Água	+
Alcalis	0/-
Álcool	+
Óleos e gorduras	+

2.2 – Processo de fabrico

Existem diversos procedimentos para a fabricação do vidro em função da sua aplicação. Para as aplicações correntes na construção (janelas, fachadas, vidro estrutural, espelhos) recorre-se normalmente ao vidro liso, e por conseguinte o processo mais utilizado é o "*float*" (Figura 4).

Este procedimento foi inventado em 1952 e começou a ser comercializado pela empresa britânica *Pilkington Brothers* em 1959. As principais vantagens são de acordo com Haldimann *et al* (4):

- Baixo custo
- Largo espectro de aplicação
- Grande qualidade óptica
- Capacidade de produzir vidro de maior dimensão

Os materiais seleccionados são misturados e introduzidos no forno a cerca de 1550°C. A mistura obtida é derramada continuamente a cerca de 1000°C para dentro de um recipiente de fundo plano que contém estanho. Devido à diferença de densidades da mistura e do estanho, este último mantém-se no fundo e o vidro flutua. O vidro arrefece, e através de rolos mecânicos, é puxado para um outro forno (forno de recozimento) onde a temperatura é de aproximadamente 600°C. É possível controlar a espessura num intervalo de 2 a 25 mm através do ajustamento da velocidade com que os rolos puxam o vidro, uma vez que, quanto maior o tempo de permanência no banho de estanho, maior é a espessura. Segue-se uma fase de arrefecimento controlado de modo a prevenir a existência de tensões residuais dentro do vidro. Depois da fase de arrefecimento, mediante equipamento próprio, o vidro é submetido a uma inspecção rigorosa e só depois se procede ao corte nas dimensões típicas de 3.20x6.00m. Antes de se proceder ao corte nas dimensões normalizadas é possível aplicar certos revestimentos com o intuito de melhorar as qualidades ópticas do vidro ("*coating*").

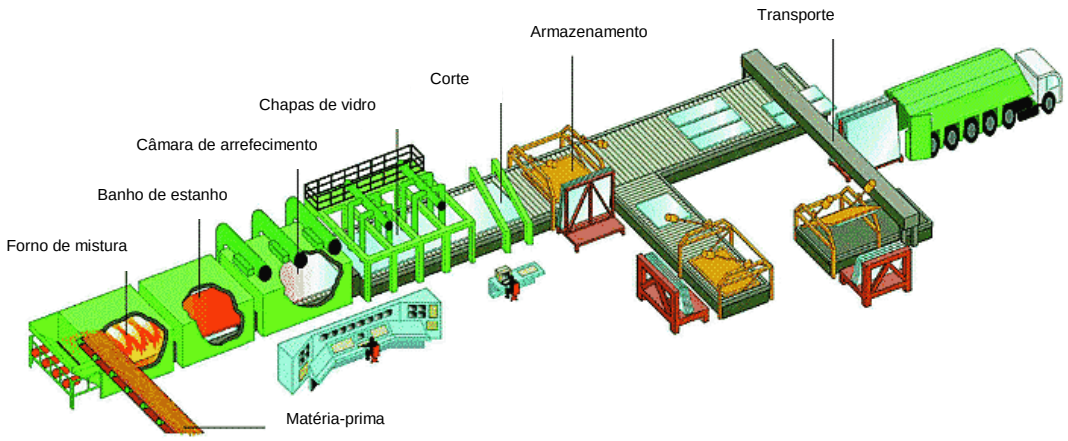


Figura 4 – Etapas do processo de fabrico float (adaptado de (32)).

2.3 – Tipos de vidros

2.3.1 - Introdução

Depois de produzido o vidro recozido, podem-se seguir, ou não, novas etapas de modo a complementar algumas características essenciais em função da futura aplicação. Um dos procedimentos mais utilizados denomina-se de têmpera térmica, do qual podem resultar vidros temperados ou termoendurecidos, sendo que este último constitui um caso intermédio entre o vidro recozido e o temperado (existe também a possibilidade de obter vidros temperados quimicamente, menos comum devido ao custo do processo).

Esta técnica consiste em aquecer o vidro até um patamar onde este se torna novamente flexível, seguindo-se um arrefecimento repentino. As fibras superficiais arrefecem mais rapidamente que as fibras interiores. Assim, as fibras superficiais restringem o encurtamento das fibras interiores, gerando-se tensões de compressão à superfície e tensões de tracção no interior (Figura 5).

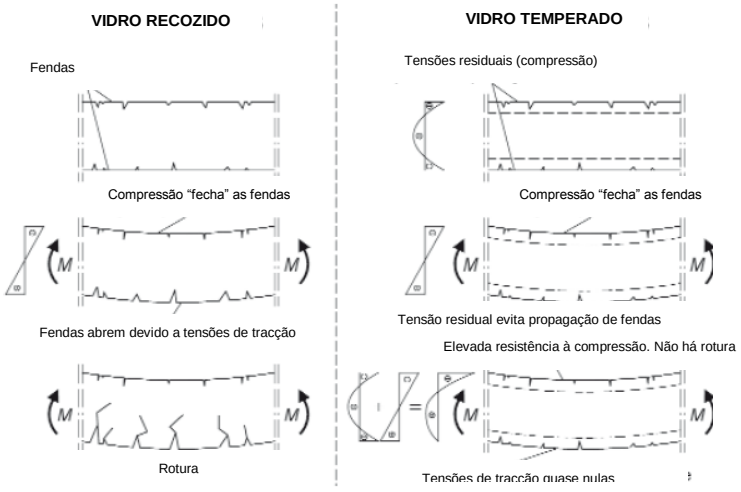


Figura 5 - Efeitos do processo de têmpera térmica (adaptado de (5)).

A tensão admissível num vidro, independentemente do tipo de vidro, é algo que está longe de ser consensual. Do ponto de vista teórico, devido às forças que se desenvolvem ao nível das ligações moleculares, o vidro deveria ter uma tensão de tracção na rotura da ordem dos 32 GPa (5). Na prática, estamos muito longe de poder considerar esse valor, fundamentalmente devido às imperfeições superficiais existentes no vidro, originadas essencialmente pelo processo de fabrico, mas também devido a descuidos ao nível do transporte e do manuseamento. Sendo a tensão de tracção do vidro dependente do número de imperfeições existentes à superfície e sendo a maioria delas invisíveis a olho nu, resulta uma enorme diversidade de resultados obtidos. A Tabela 3 resume alguns dos valores utilizados por algumas normas e fabricantes mais conceituados.

Tabela 3 - Tensões de tracção admissíveis no vidro [MPa].

	Recozido		Termoendurecido		Temperado	
Norma	**cp**	**lp**	**cp**	**lp**	**cp**	**lp**
NF DTU39	20	*16(10)	35	*28(17,5)	50	*40(25)
ASTM E2751-11	18,3	5,7	36,5	20,3	73	49,4
Pilkington	17,8	7	-	-	59	35
SaintGobain	16	8	35	20	50	40

* Para vidros sujeitos a cargas permanentes apoiados em toda a periferia (ou outros casos de apoio);

cp – cargas de curto prazo

lp – cargas de longo prazo

Para além das imperfeições, existem também outros factores que influenciam a resistência mecânica do vidro, como por exemplo:

- Dimensão do vidro
- História de carregamento

Naturalmente que quanto maior o vidro, maior é o número de imperfeições e consequentemente maior a probabilidade de rotura. Segundo Overend (5), o vidro é um material sensível ao fenómeno *stress corrosion*, isto é, quando é carregado sob condições atmosféricas (sobretudo humidade), o tamanho das imperfeições aumenta, diminuindo a capacidade resistente do vidro (Figura 6), pelo que a história do carregamento (duração das cargas actuantes) assume um carácter preponderante na resistência mecânica do vidro.

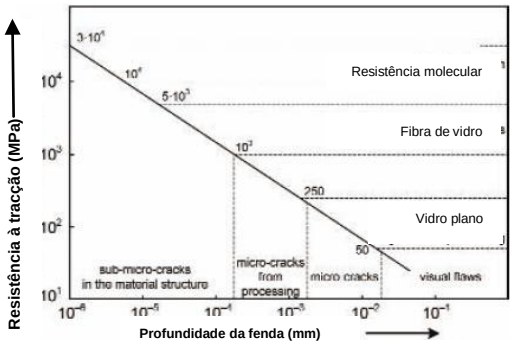


Figura 6 – Relação tensão resistente/dimensão da imperfeição (adaptado de (5)).

2.3.2 – Vidro recozido

Obtido através do processo de fabrico explicado em 2.2, ao qual não se segue nenhum tratamento. Em caso de rotura, os fragmentos são geralmente de maiores dimensões e com formas pontiagudas, representando um maior risco de ferimentos (Figura 7).

2.3.3 – Vidro temperado

Durante o tratamento térmico o vidro é aquecido até aproximadamente 620°C-675°C, seguindo-se o arrefecimento rápido por intermédio de jactos de ar.

Quando as tensões de tracção ultrapassam a tensão última do vidro, o equilíbrio entre a parte comprimida e a parte traccionada é destabilizado e o resultado é uma 'explosão' que origina centenas de fragmentos de pequenas dimensões como se pode ver pela Figura 7, diminuindo o risco de ferimentos para as pessoas. Apesar de ser o vidro com maior tensão resistente, o seu comportamento pós rotura (quando utilizado em vidro laminado, ver capitulo 2.3.5) é fraco devido à dimensão reduzida dos seus fragmentos (Figura 8). Uma outra desvantagem está relacionada com a impossibilidade de se proceder ao corte/furação do vidro depois de temperado, devido às tensões residuais existentes.

2.3.4 – Vidro termoendurecido

Obtido por um processo idêntico ao do vidro temperado, porém submetido a uma taxa de arrefecimento inferior, originando tensões residuais inferiores no vidro (comparativamente com o temperado). Como resultado temos um vidro com menor capacidade resistente que o temperado, ainda assim, pelos seus fragmentos serem maiores (Figura 7) o seu comportamento pós-rotura é superior (a questão do comportamento pós-rotura é apenas aplicável no caso do vidro laminado, explicado na secção seguinte).

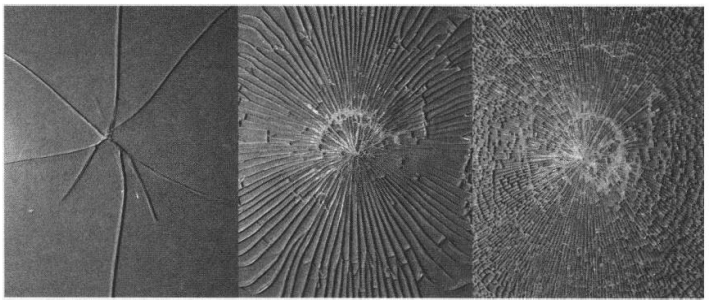


Figura 7 - Padrão de fendilhação do vidro recozido, termoendurecido e temperado (adaptado de (19)).

2.3.5 – Vidro laminado

O vidro laminado, também conhecido como vidro de segurança[1], é utilizado para conferir ao vidro algum comportamento ao nível de segurança. Objectivo esse, que é conseguido mediante a colagem de dois ou mais vidros com recurso a películas produzidas à base de polímeros (normalmente de PVB). Em caso de rotura, esta não ocorre espontaneamente como no caso dos vidros simples, uma vez que os fragmentos permanecem colados à película, oferecendo resistência residual a todo o sistema.

O tipo de vidro utilizado depende do tipo de uso, por exemplo, no caso de coberturas é importante que o pano inferior seja temperado, já que em caso de rotura, a dimensão reduzida dos fragmentos diminui o risco de lesões. Por outro lado, no caso de uma *glass fin*, convém intercalar o vidro temperado com um termoendurecido, já que o comportamento pós-rotura é tanto melhor quanto maior for a dimensão do fragmento (Figura 8). Em todo o caso, sempre que não exista regulamentação específica, cabe ao projectista fazer um balanço entre tensão resistente e segurança.

Aumento do desempenho estrutural e da resistência ao impacto
Vidro recozido
Vidro termo-endurecido
Vidro temperado
Aumento da capacidade resistente após a rotura

Figura 8 - Relação entre o tamanho do fragmento, o comportamento estrutural e o desempenho pós-rotura (adaptado de (4)).

Overend (5) apresenta um modelo para o mecanismo de rotura de um vidro laminado, e que se pode descrever em quatro passos tal como mostra a Figura 9.

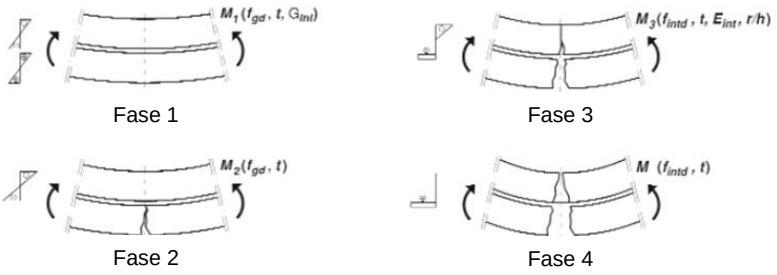


Figura 9 - Mecanismo de rotura de um vidro laminado (adaptado de (5)).

[1] O vidro laminado apenas é considerado vidro de segurança se tiver sido aprovado no teste de resistência ao impacto.

Fase 1

Nesta fase ainda não existem fendas, e a resistência do conjunto é função da tensão de tracção resistente do pano inferior, da duração da carga e do módulo de resistência ao corte da película.

Fase 2

O pano inferior está fissurado, a partir deste momento a tensão resistente depende da tensão de tracção do pano superior e da duração da carga.

Fase 3

Os fragmentos do pano superiores estão comprimidos, e do contacto entre eles resulta um acréscimo de resistência. Sendo que neste momento a tensão resistente é função do tamanho do fragmento, do módulo de elasticidade da película, da tensão resistente da película e da duração do carregamento.

Fase 4

Já não há contacto entre os fragmentos, sendo apenas a capacidade resistente da película e a duração do carregamento as únicas variáveis a ter em conta na resistência do sistema.

O comportamento mecânico de um vidro laminado é assim dependente da capacidade de transmissão de carga da película que une os diversos panos de vidro. No caso da flexão, é extremamente importante o módulo de resistência ao corte, G. Os adesivos mais conhecidos são os compostos de PVB e os ionoplásticos *(SentryGlasPlus*®), cujos desempenhos podem ser completamente distintos consoante as condições de utilização. As películas de PVB continuam a ter uma grande influência no mercado actual, sendo normalmente a solução utilizada para vidro laminado. SentryGlasPlus® é um produto comercializado pela empresa *Dupont*, cuja utilização tem vindo a crescer nos últimos anos devido à sua elevada rigidez.

Numa abordagem meramente teórica pode-se pensar em dois casos extremos, como mostra a Figura 10. No primeiro caso (a), G assume um valor infinito e a transmissão de carga entre os dois vidros é total aproximando-se do comportamento monolítico. Já no segundo caso (b), temos o contrário, se G estiver próximo de zero os dois panos trabalham separadamente, assistindo-se eventualmente a um escorregamento entre ambos. Na prática temos casos intermédios, que dependendo do tipo de material utilizado se situam mais próximo do primeiro ou do segundo.

Figura 10 - a) G muito elevado, comportamento monolítico. b) G muito reduzido, escorregamento.

As películas são compostas por polímeros que por serem materiais viscoelásticos, o seu comportamento é altamente influenciado pela temperatura e pela duração do carregamento a que estão sujeitos.

Na Tabela 4 são comparadas as principais características de ambos os materiais. A principal diferença reside no módulo de elasticidade e consequentemente no módulo de resistência ao corte.

Tabela 4 – Propriedades físicas das películas de PVB e de SGP (adaptado de (6)).

PROPRIEDADE	UNIDADE	VALOR		ASTM Test
		PVB	*SGP*	
Módulo de Young	MPa	11	300	D5026
Tensão de tracção	MPa	28,1	34,5	D638
Alongamento	%	275	400	D638
Densidade	g/cm³	1,07	0,95	D792
Coeficiente de dilatação térmico	10^{-5}	41,2	10 a 15	D696

Num trabalho publicado por Bennison *et al* (6), são realizados ensaios com o intuito de comparar o comportamento entre três vigas distintas, uma monolítica de 9.5mm de espessura, uma laminada (4.7x4.7) com PVB (0,76mm) e outra laminada (4.7x4.7) com SGP (0,76 mm), submetidas à flexão.

À partida parece surpreendente que o modelo de SGP seja mais rígido que o modelo monolítico (Figura 11), porém a sua resistência ao corte é tão elevada que a sua capacidade de transmissão de carga é total, tornando-o completamente rígido e como é mais espesso (contabilizando a camada de SGP), para a mesma quantidade de vidro obtém-se maior capacidade de carga.

O estudo demonstra ainda que as películas de SGP são mais estáveis que as películas de PVB face ao aumento de temperatura (Figura 12). Até temperaturas de aproximadamente 45°C, as películas de SGP são insensíveis ao calor, ao contrário do que acontece com as películas de PVB, que a partir dos 10°C perdem rigidez muito rapidamente.

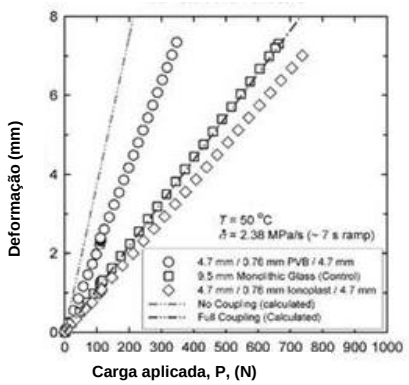

Deformação (mm)
Carga aplicada, P, (N)
T = 50 °C
δ = 2.38 MPa/s (~ 7 s ramp)
4.7 mm / 0.76 mm PVB / 4.7 mm
9.5 mm Monolithic Glass (Control)
4.7 mm / 0.76 mm Ionoplast / 4.7 mm
No Coupling (calculated)
Full Coupling (Calculated)

Figura 11 - Análise comparativa de vigas coladas com PVB vs SGP (P/d) (adaptado de (6)).

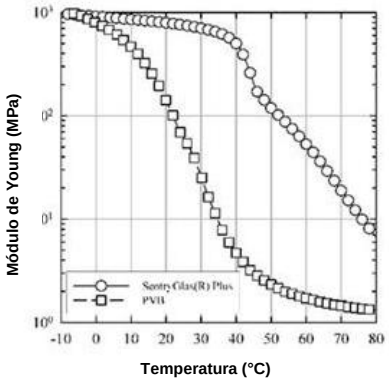


Figura 12 - Efeito da temperatura no módulo de elasticidade das películas de SGP e PVB (adaptado de (6).

Apesar de algumas normas recomendarem a não contabilização da resistência ao corte das películas de PVB, a verdade é que estas oferecem um acréscimo de rigidez relativamente ao caso limite onde não há transferência por corte.

Para fins estruturais, utiliza-se o conceito de espessura equivalente para o cálculo de deformações, onde para as películas de PVB e de um modo conservativo se pode desprezar o acréscimo de rigidez, enquanto para as secções laminadas coladas com SGP são equivalentes para efeitos de cálculo a secções monolíticas, pelo que se tem:

$$e_{eq}^{PVB} = \sqrt[3]{\sum_i {e_i}^3} \quad \textbf{Eq. 1}$$

$$e_{eq}^{SGP} = \sum_i e_i \quad \textbf{Eq. 2}$$

Face às diferenças anunciadas, o comportamento pós-rotura é significativamente diferente. Em caso de rotura, os vidros colados com SGP oferecem níveis de resistência superiores, permanecendo no seu lugar durante mais tempo e com maior segurança (7).

2.3.6 – Vidros tecnológicos

2.3.6.1 - Vidros de auto limpeza

É um vidro fabricado pelo processo *float* no qual se aplica uma fina camada de óxido de titânio, conferindo-lhe propriedades semi-condutoras e hidrofílicas. São vidros com maior capacidade de absorção de radiação UV que promove a redução da matéria orgânica e reduz também a aderência da matéria inorgânica. A água da chuva ao passar remove a sujidade Figura 13.

Figura 13 - Viaduto com barreira acústica composta por *BIOCLEAN*® (13).

2.3.6.2 - Vidros “inteligentes”

Actualmente estão disponíveis vidros que oferecem um comportamento dinâmico (Figura 14), isto é, são capazes de alterar algumas propriedades, como a transmitância térmica e a luminosa controlando a quantidade de radiação infravermelha que penetra o edifício, em função da vontade do utilizador.

Os vidros são dotados de uma película no seu interior capaz de alterar as suas propriedades ópticas (tipicamente de oxido de tungsténio). A tecnologia consiste na transferência de iões de lítio ou de hidrogénio para essa película com características electrocrómicas (Figura 15) mediante a indução de corrente eléctrica. Ao receber esses iões, essa camada altera as suas propriedades ópticas, absorvendo a radiação visível, tornando-se assim opaco. Para tornar o vidro transparente de novo basta inverter o processo.

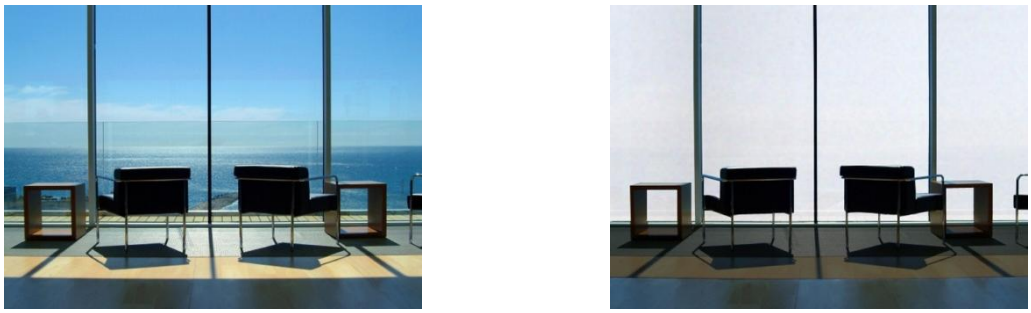


Figura 14 – Vidro inteligente. Modo transparente e modo opaco (adaptado de (31).

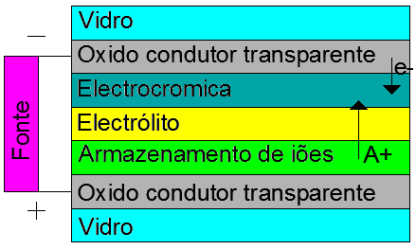


Figura 15 - Esquema de funcionamento de um vidro inteligente (adaptado de (31)).

2.4 – Defeitos

O processo de fabrico *float* possui alguns inconvenientes relativamente à capacidade resistente do vidro. As duas superfícies do vidro não são exactamente idênticas devido à difusão de alguns átomos de estanho na face com que entra em contacto, podendo ter alguma influência na colagem dos vidros

laminados, Haldimann *et al* (4). Também na superfície que está em contacto com o estanho, descobriu-se que não possui a mesma resistência que a face que está em contacto com o ar, isto deve-se ao contacto com os rolos mecânicos que induzem algumas imperfeições.

Por vezes a composição do vidro pode conter algumas impurezas de sulfatos e sulfuretos de níquel, provenientes de alguns contaminantes ricos em níquel que inevitavelmente são introduzidos durante o processo de fabrico (8). No vidro recozido, estas impurezas são inofensivas, porém no caso dos vidros sujeitos a tratamentos térmicos, se a impureza estiver situada na zona traccionada (fibras interiores), pode originar a rotura espontânea do vidro,

Existe actualmente um método de despiste utilizado em fábrica denominado de *Heat soaked test,* regulamentado pela norma europeia EN14179 e que detecta a presença destas impurezas impedindo a sua comercialização. O ensaio consiste em três fases: aquecimento, manutenção da temperatura a um determinado patamar e arrefecimento Figura 16.

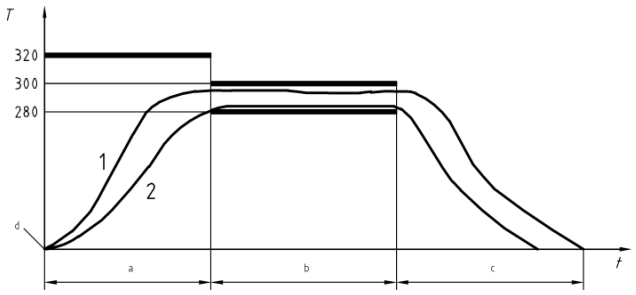


Figura 16 - Heat soaked test - Esquema de funcionamento do ensaio (EN 14179).

Os vidros são aquecidos numa primeira fase até 280°. Segue-se um período de 2h, onde a temperatura é mantida. A fase de arrefecimento começa quando o último vidro a atingir os 280°C termina a segunda fase. Caso não tenha ocorrido a rotura do vidro, significa que este está aprovado e portanto não está sujeito à ocorrência de uma rotura espontânea devido à presença de sulfato de níquel.

3 - Análise de estruturas de vidro

3.1 - Nota introdutória

Na concepção de construções de vidro, para que estas sejam capazes de desempenhar correctamente as funções para as quais são projectadas, é necessário ter em consideração questões relativas às mais diversas áreas da engenharia.

Este capítulo começa por descrever as acções que devem ser tidas em conta no cálculo estrutural bem como a sua determinação com base na regulamentação europeia.

No cálculo estrutural de elementos em vidro, as ligações representam zonas de concentração de tensões em virtude da incapacidade do vidro de trabalhar em regime plástico, e por isso, são frequentemente aspectos condicionantes no dimensionamento global da estrutura.

São exigidos aos edifícios de hoje, seja por imposição normativa seja por imposição dos consumidores, critérios apertados relativamente ao desempenho térmico e acústico, que obrigam no caso das fachadas de vidros a recorrer a soluções mais complexas do ponto de vista estrutural e mais espessas (vidros duplos ou triplos). Dependendo também do local onde é colocado e da função para a qual foi concebido poderão existir determinadas exigências do ponto de vista da segurança contra a intrusão e da segurança contra incêndios. Aqui procura-se sensibilizar o leitor para todos esses aspectos bem como a sua influência no cálculo do vidro estrutural.

3.2 – Acções directas

3.2.1 – Peso próprio

O peso próprio deve ser determinado de acordo com a EN1991-1-1 e tem de ser transmitido à estrutura do edifício em segurança. Normalmente o peso próprio é a única acção de carácter permanente que actua em estruturas de vidro (*stress corrosion*). Os pesos volúmicos dos materiais utilizados são:

- Vidro - 25 kN/m³
- Aço – 77 kN/m³

3.2.2 – Vento

O vento é normalmente a acção condicionante no dimensionamento dos elementos estruturais que compõem uma fachada de vidro e é calculado de acordo com a norma EN 1991-1-4. A transmissão de cargas da fachada para a estrutura do edifício tem de ser feita de uma forma segura através de fixações destinadas ao efeito.

No capítulo quatro é estudado um caso prático do cálculo estrutural de uma fachada em que o a acção do vento é assumida como 1,5 kN/m². A justificação do valor adoptado encontra-se no anexo I.

3.2.3 – Neve

A acção da neve deve ser tida em conta no cálculo de coberturas, e deve ser determinada de acordo com a EN 1991-1-3. No presente trabalho esta acção não é tida em conta visto não se aplicar aos casos estudados (capitulo 4).

3.2.4 – Sobrecargas em edifícios

Cargas horizontais em guarda-corpos e paredes divisórias com funções de guarda

No caso das fachadas, estas devem resistir a uma carga permanente horizontal ao nível do peitoril, tal como especificado na EN 1991-1-1 de acordo com a NP EN 13830. Considera-se que esta sobrecarga actua a uma altura de 1,20m e com um valor que varia conforme a categoria do edifício. No caso prático analisado, considerou-se uma carga de 1,0 kN/m

Pavimentos

No caso dos pavimentos, deve ser considerada a actuação de uma sobrecarga uniforme (*qk*) actuando na zona mais desfavorável. De modo a garantir uma resistência local mínima, deve ser considerada, embora separadamente, a actuação de uma carga pontual (*Qk*). O calculado do pavimento no capítulo 4, tem em conta os casos de carga utilizados no dimensionamento do Grand Canyon Skywalk (9), uma vez que este se segue pela norma ASTM E 2751-11, e que são precisamente:

- *qk*=7,0 kN/m²
- *Qk* =1,340 kN

No caso referido não houve qualquer majoração de cargas, utilizando-se os valores nominais das acções.

Alternativamente pode-se considerar as acções previstas na norma europeia e limitar a tensão máxima no vidro de acordo com a NF DTU 39 P3. A EN 1991-1-1 estabelece como sobrecargas em pavimentos (categoria C3):

- *qk*=5,0 kN/m²
- *Qk* =4,0 kN

Onde as combinações de acções são:

- ELU, $Fd = G + 1{,}5 * Q$ - Verificação de segurança das ligações
- ELS, $Fd = G + Q_{k,1}$ – Controlo da tensão máxima no vidro.

Sendo o vidro produzido por processo industrial, e por isso sujeito a um rigoroso controlo de qualidade, não faz de todo sentido majorar o peso próprio do vidro.

Coberturas

No caso das coberturas deve ser feita a distinção entre cobertura acessível e cobertura não acessível. As coberturas em vidro são geralmente não acessíveis, ainda assim é necessário segundo a EN 1991-1-1 considerar os efeitos de possíveis operações de manutenção e reparação.

3.3 – Deformações impostas

Efeitos térmicos

O efeito da temperatura não pode ser negligenciado. No caso das fachadas (geralmente compostas por vidro laminado), o vidro exterior está sujeito a uma maior exposição solar que o interior de tal forma que existe um diferencial de temperatura entre as duas ou mais lâminas. O vidro exterior (mais quente) ao tentar expandir é restringido pelo vidro interior (mais frio), induzindo neste, tensões de tracção que ao não serem controladas podem originar a rotura do vidro.

Um fenómeno semelhante acontece no caso dos vidros encastrados em pavimentos, onde a zona exposta à radiação solar encontra-se a uma temperatura superior à zona que se encontra ensombrada, o que associado à baixa condutibilidade térmica superficial do vidro, origina tensões de compressão na zona exposta e tensões de tracção na zona não exposta à radiação solar, podendo originar a rotura do vidro (Figura 17).

Da resistência de materiais têm-se as seguintes relações:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$ **Eq. 3**

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{(L + \alpha.\Delta T.L) - L}{L} = -\alpha.\Delta T$$ **Eq. 4**

pelo que,

$$\varepsilon_1 = \alpha.\Delta T_1 = \alpha.(T_0 - T_1)$$ **Eq. 5**

$$\varepsilon_2 = \alpha.\Delta T_2 = \alpha.(T_0 - T_2)$$ **Eq. 6**

então,

$$\Delta\sigma = E.\Delta\varepsilon = E.\alpha.(T_1 - T_2)$$ **Eq. 7**

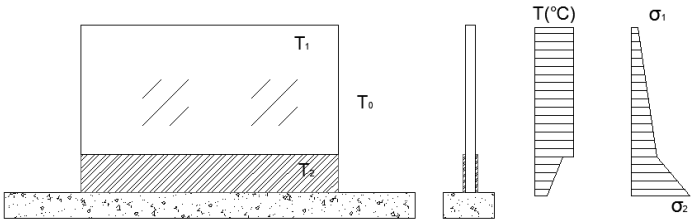


Figura 17 - Tensões de origem térmica devido ao ensombramento do caixilho.

Haldimann *et al* (4) recomenda que para o controlo dos efeitos térmicos no vidro, é necessário considerar factores como:

- Tensão máxima admissível;
- Factor de absorção solar do vidro;
- Intensidade da radiação solar;
- Coeficiente de transmissão térmica;
- Coeficiente de transmissão térmica superficial;
- Amplitude térmica diurna;
- Temperatura interior no edifício;
- Sombras.

O controlo das tensões de origem térmica é frequentemente feito com base em amplitudes térmicas máximas. A Tabela 5 mostra o diferencial térmico máximo admissível para diversos tipos de vidro, de acordo com testes desenvolvidos pela empresa *Pilkington,* admitindo uma duração máxima de 3,5 horas por dia.

Tabela 5 – Amplitudes térmicas admissíveis no vidro (adaptado de (4)).

	ΔT(°C)	
	Cortado	**Polido**
Recozido, h<12 mm	35	45
Recozido, h=15 ou 19 mm	30	40
Recozido, h =25 mm	26	35
Padronizado	26	26
Aramado	22	22
Termoendurecido	100	100
Temperado	200	200

3.4 – Sistemas de conexão

3.4.1 – Introdução

A ideia chave dum sistema de conexão em estruturas de vidro, passa por evitar o contacto directo entre o vidro e os metais normalmente utilizados para o efeito. (por exemplo o aço).

Ao longo da história das conexões, a evolução tem vindo a ser feita sempre no sentido da diminuição da obstrução visual através de uma redução do tamanho dos dispositivos de conexão e com o consequente aumento de tensões no vidro.

Pode-se dividir os sistemas de conexão em dois grandes grupos, as fixações mecânicas e as fixações através de adesivos (silicone estrutural). Este último grupo, mais recente, trouxe a possibilidade enfrentar novos desafios na utilização do vidro.

3.4.2 – Fixações mecânicas

3.4.2.1 – Apoio pontual – Vidro agrafado

O vidro agrafado é frequentemente utilizado em fachadas, mas também é possível a sua utilização para outros fins como coberturas, revestimentos de parede, mobiliário urbano, ou decoração de interiores. A sua grande vantagem reside no aumento significativo da transparência e do conforto óptico (Figura 18). As fixações são conseguidas por intermédio de uns dispositivos mecânicos em aço inoxidável (usualmente denominados de aranhas, Figura 19).

As ligações aparafusadas têm uma enorme aplicação nas estruturas de aço, visto que estas possuem um comportamento elastoplástico, traduzindo-se numa capacidade de redistribuição de tensões entre os diversos parafusos que compõem a ligação, porém o mesmo não se sucede nas estruturas de vidro (capitulo 2).

Figura 18 – Fachada em vidro agrafado, Instituto Superior Técnico, Campus Tagus Park.

Figura 19 - "Aranha" (adaptado de (47)).

O contacto entre o vidro e o parafuso é assim impedido mediante a introdução de um material de enchimento (ex: silicone, Figura 20) mais flexível, para redistribuir tensões, mas com rigidez suficiente para assegurar que transmissão de tensões ocorre efectivamente. Adicionalmente, devem conferir ainda estanqueidade à fachada.

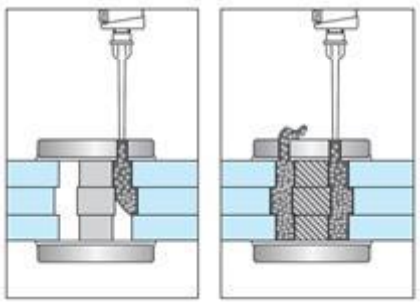


Figura 20 - Preenchimento da folga em ligações aparafusadas (adaptado (37)).

Este tipo de solução pode ser combinada tanto com vidros simples (laminados ou não) ou com vidros duplos. Por outro lado, e devido à concentração de tensões juntos dos parafusos, não se deve utilizar esta variante em vidro recozido.

A gama de fixações existentes é vasta, dando ao projectista a liberdade de escolha do tipo de apoio pretendido (rotação livre ou impedida). A **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** ilustra alguns dos sistemas existentes no mercado.

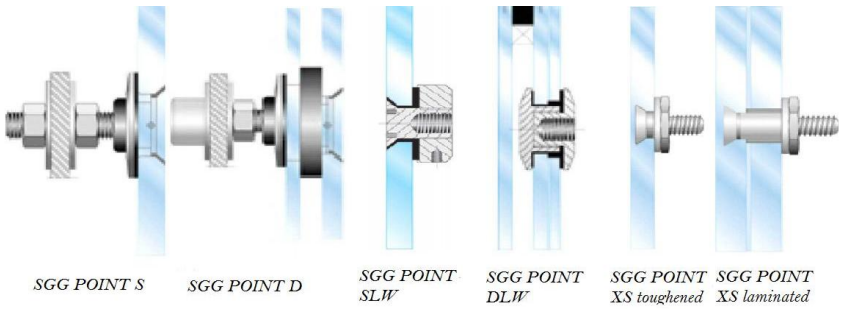


Figura 21 - Sistemas de fixação para vidro agrafado (adaptado de (13)).

As gamas *S* e *D*, destinam-se a ligações articuladas de vidros simples e duplos respectivamente. As *LW* representam ligações rígidas (perfurante para vidro simples e não perfurante para vidro duplo), e por ultimo as gamas *XS*, mais recentes, são igualmente ligações rígidas porém não perfurantes (utilizadas em vidro simples, monolítico e laminado). O tipo de ligação a escolher deverá atender a questões como o custo dos sistemas, uma vez que as ligações articuladas são significativamente mais dispendiosas, mas por outro lado diminuem a tensão de pico no vidro, podendo-se optar por soluções menos espessas.

A geometria da conexão tem uma grande influência no estado de tensão do vidro, Haldimann *et al* (4) recomenda que se atenda a questões como:

- O diâmetro do furo;
- A relação entre o diâmetro do parafuso e o diâmetro do furo (quanto maior a folga, maior será a tensão máxima);
- A distância entre o furo e o bordo;
- O atrito entre o vidro e o material de enchimento;
- Excentricidade das cargas aplicadas.

A geometria de furos em vidros temperados e em vidros termoendurecidos é regulamentada pelas normas EN12150-1 e a EN1863-1 respectivamente. As mesmas normas estipulam valores máximos admissíveis para as variações dimensionais (anexo II).

Adicionalmente, é obrigatório que o vidro utilizado para este fim, tenha sido submetido ao ensaio térmico suplementar *Heat soaked test* (ver capitulo 2).

Estes sistemas têm de ser capazes de resistir a eventuais deslocamentos relativos que possam ocorrer entre o vidro e a estrutura de suporte, por exemplo devido a movimentos térmicos. Uma das soluções encontradas está na diferente execução dos furos que pode conferir alguma liberdade de movimentos (furos ovalizados).

3.4.2.4 – Grampos metálicos e ligações por aperto-fricção

Os grampos metálicos são colocados em zonas discretas de modo a minimizar o impacto visual aumentando a transparência da solução. Estes dispositivos são fixados à subestrutura, podendo esta ser de natureza diversa. Trata-se de uma solução frequentemente adoptada em guardas de segurança ou em varandas (Figura 22 e Figura 23). Os grampos destinam-se normalmente à transferência de cargas perpendiculares ao plano, sendo o seu peso próprio transmitido à subestrutura por intermédio de dispositivos mecânicos, denominados na literatura estrangeira por *"setting blocks"*. Os grampos são regularmente utilizados em casos onde a força de atrito que é necessário mobilizar é reduzida.

Salienta-se novamente a necessidade de impedir o contacto directo entre o vidro e os grampos metálicos, que habitualmente é conseguido através da introdução de uma camada de neoprene na interface de contacto.

Figura 22 - Guarda corpos com recurso a vidro fixado por grampos metálicos (Montanha Tianmen, China (54)).

Figura 23 - Grampo metálico (50).

Para soluções de maior exigência estrutural, onde seja necessário transmitir cargas no próprio plano, a conexão é feita com sistemas mais sofisticados e aptos para mobilizar forças de atrito superiores (ligações por aperto-fricção). Estas ligações recorrem ao uso de chapas metálicas aparafusadas duas a duas, com parafusos pré-esforçados (Figura 24 e Figura 25). Constitui, teoricamente, uma solução mais adequada do que as ligações que recorrem exclusivamente a parafusos, dado que, a existência de uma chapa metálica permite ter uma zona de contacto superior diminuindo assim o efeito de tensões localizadas, embora seja de qualidade inferior sob o ponto de vista estético.

Figura 24 - *Glass fin* com fixação por aperto-fricção, Austrália (53).

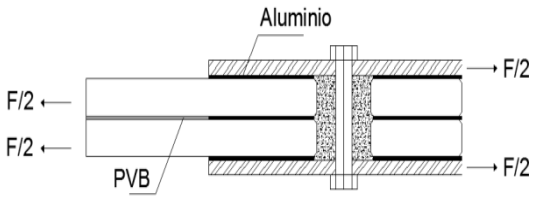


Figura 25 - Esquema de fixação (adaptado de (4)).

Para impedir o contacto directo entre o vidro e o parafuso, são previstas folgas que devem ser preenchidas com um material adequado. Este material tem de ser suficientemente rígido para que não transborde no momento em que se dá o aperto dos parafusos. Adicionalmente, não deve ser muito duro para não danificar o vidro, nem sensível a fenómenos de fluência sob o risco de diminuir a tensão induzida nos parafusos, colocando em causa a operacionalidade da ligação (exigências igualmente aplicáveis no caso das ligações aparafusadas discutidas na secção anterior).

Os vidros laminados são tipicamente colados com películas de PVB, que por não serem suficientemente rígidas podem transbordar devido à pressão exercida pela chapa no vidro, pelo que

se deve, apenas na zona da ligação, substituir as películas de PVB pelo material utilizado na interface chapa-vidro (Figura 25).

O material a utilizar no preenchimento da folga entre o parafuso e o vidro (aplicável também no caso do vidro agrafado), pode ser condicionante no dimensionamento de uma viga de vidro, dependendo da sua maior ou menor capacidade de redistribuição de tensões. Os parafusos deslocam-se do centro do furo, aproximando-se do bordo. Tradicionalmente, o contacto entre o vidro e o parafuso era impedido por uma protecção de neoprene de reduzida espessura. Solução essa, que é actualmente desaconselhável dada a sua deficiente capacidade de redistribuição de tensões fazendo com que apenas parte do bordo suporte as tensões provenientes do parafuso, aumentando a tensão de pico. Para que se possa contar com uma correcta uniformização de tensões em torno do parafuso aconselha-se o uso de uma solução onde a folga entre o parafuso e o vidro seja totalmente preenchida por silicone (Figura 26). No capítulo 4, é estudado em pormenor este problema com recurso a modelos de elementos finitos.

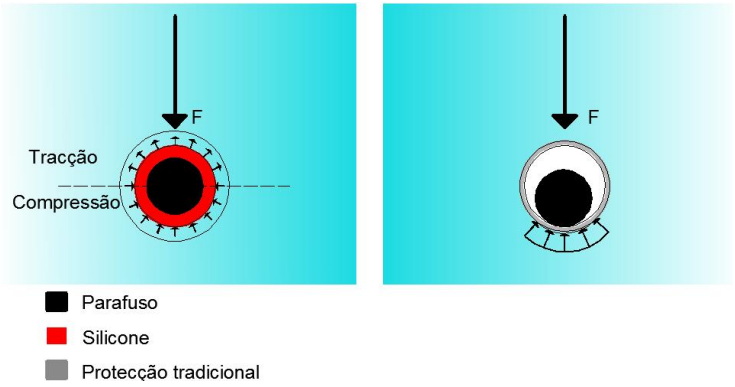


Figura 26 - Tensões de contacto entre vidro e parafuso.

3.4.2.3 – Apoio Continuo

Os apoios contínuos têm uma grande aplicação em cortinas de vidro com painéis rectangulares, podendo ser simplesmente apoiado em dois ou em quatro bordos. Normalmente, a primeira solução é mais utilizada e consiste no travamento do painel, através de dois perfis (alumínio ou madeira) que em conjunto resistem às cargas laterais, provenientes fundamentalmente da acção do vento (Figura 27). O peso próprio é resistido por um dispositivo mecânico de plástico, colocado no bordo inferior (“*setting block”).*

O painel é fixado aos apoios através de uma camada de EPDM ou silicone, que confere uma boa capacidade de rotação, e portanto do ponto de vista dos modelos de cálculo, resulta uma boa aproximação ao apoio simples.

Figura 27 - Vão envidraçado, caixilharia de madeira, Londres (2).

Alternativamente a este sistema, tem-se actualmente painéis suportados por silicone estrutural, que se abordam na secção seguinte.

Tipicamente, este painéis não são dimensionados para resistir a carga no próprio plano (peso próprio), porém, é possível dotá-los dessa capacidade mediante a adopção de certas precauções que se enumeram segundo Haldimann *et al* (4):

- A reacção dos apoios não deve ser introduzida no vidro imediatamente antes dos bordos, ou seja, deve ser deixada uma folga de modo a não induzir um acréscimo de tensões em zonas sensíveis como os bordos
- Os bordos devem ser polidos, de modo a evitar uma concentração de tensões localizada que possa provocar a rotura do vidro.
- Eventuais movimentos térmicos devem ser perfeitamente acomodados.
- Os vidros laminados, especialmente se forem compostos por diferentes tipos, podem ter variâncias dimensionais (provenientes do processo de fabrico) que se não forem bem acomodadas originam uma distribuição de tensões deficiente. O caixilho deve ser injectado com um material capaz de acomodar essas diferenças para diminuir a eventual assimetria na transmissão da carga entre o apoio e o vidro.

3.4.3 – Silicone estrutural

A utilização de silicone como adesivo estrutural tem vindo a crescer em detrimento das fixações mecânicas, não apenas nas ligações entre o vidro e o alumínio (apoios contínuos), mas também nas ligações vidro-vidro e vidro-aço. As grandes vantagens desta tipologia são:

- Maior visibilidade e melhores características estéticas;
- Inexistência de trabalhos adicionais no vidro;
- Não necessita de sistemas dispendiosos de fixação em aço inoxidável (aranhas);
- Diminuição da tensão máxima no vidro;
- Simplicidade de cálculo.

Podemos ter dois bordos (Figura 28) ou quatro bordos (Figura 29) apoiados em silicone estrutural.

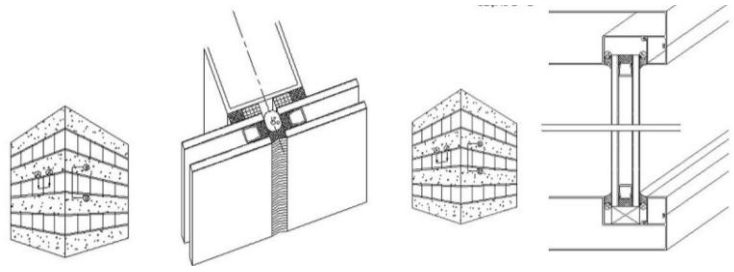


Figura 28 - Painel apoiado em silicone estrutural em dois bordos (adaptado de (10)).

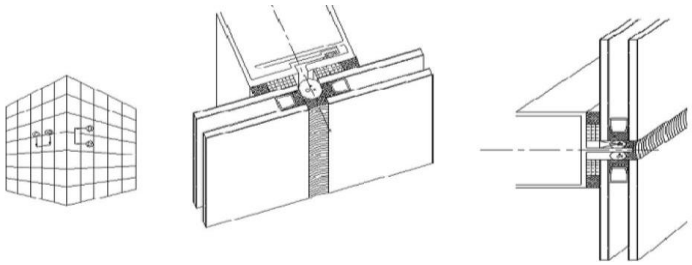


Figura 29 - Painel apoiado em silicone estrutural em todos os bordos (adaptado de (10)).

No primeiro caso, o silicone estrutural pode ser colocado tanto na horizontal como na vertical, sendo que os restantes bordos podem ser, ou não, fixados mecanicamente. Existe a possibilidade de execução em fábrica ou "*in-situ*". No segundo caso, os quatro bordos são ligados à estrutura através de silicone estrutural. O peso próprio pode ser resistido pelo próprio silicone (embora alguns regulamentos internacionais o proíbam) ou pode ser transmitido à estrutura através de um dispositivo de apoio que se coloca no bordo inferior (*"setting block"*).

Não existe na Europa regulamentação relativa ao uso de adesivos estruturais porém o organismo europeu EOTA (*European Organisation for Technical Approvals*) elaborou um documento, *Guideline for European Technical Approval of Structural Sealant Glazing Systems*, onde se encontram recomendações para o uso destes sistemas.

As juntas estruturais devem ser dimensionadas em função das solicitações a que estão sujeitas. Na Figura 30, a largura da junta, j, é:

$$j = \frac{0{,}5.\, l.\, p}{\sigma_r} \qquad \textbf{Equação 3 . 1}$$

e a espessura da junta, *e*, é:

$$e^2 = e_0^2 + d^2 \qquad \textbf{Equação 3 . 2}$$

onde,

l – largura do bordo não apoiado (m)

p – pressão do vento (Pa)

σ_r – tensão resistente do silicone (Pa)

e_0 - espessura inicial ($\approx j/3$) de acordo com o fabricante Dow Corning (10)

d – deslocamento diferencial entre o vidro e o substrato onde assenta o silicone.

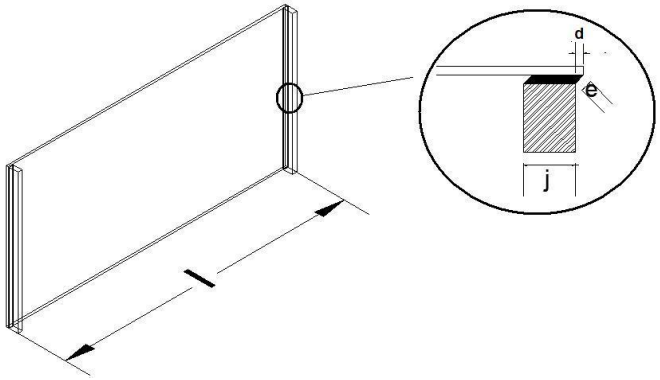


Figura 30 - Movimento térmicos, junta estrutural.

3.5 – Exigências funcionais

3.5.1 – Exigências térmicas

As trocas de energia podem se dar por convecção, por condução e por radiação. O primeiro envolve deslocação de matéria devido à variação da densidade do fluido ou do gás, que é função da temperatura a que se encontra. O fenómeno de condução, não envolve a deslocação de matéria e dá-se através de um sólido sempre que duas faces opostas se encontrem a diferentes temperaturas (o fluxo de calor dá-se sempre no sentido da superfície mais quente para a superfície mais fria). Qualquer corpo emite radiação, assim sendo, existe troca de energia por radiação entre dois corpos sempre que estes se encontrem a diferentes temperaturas (o fluxo de calor é do mesmo modo, no sentido do corpo mais quente para o corpo mais frio).

Nesta secção, procura-se descrever as principais preocupações relativas à eficiência térmica do edifício na concepção dos sistemas em vidro, descrevendo o comportamento do material face às diferente solicitações e ainda esclarecer quais as técnicas mais usadas para melhorar o desempenho térmico do vidro.

Condutibilidade térmica

Cada material possui a sua própria condutibilidade térmica *λ*(W/m°C), propriedade que caracteriza os materiais termicamente homogéneos e fisicamente representa a quantidade de calor (*W*) que atravessa uma dada espessura unitária (m) quando há uma diferença de temperatura de 1°C.

O envelhecimento dos materiais e a variabilidade das condições “in-situ” em relação às condições no momento da determinação do valor declarado[2] da condutibilidade, obriga a que se tenha em consideração uma margem de segurança capaz de cobrir esses desvios a longo prazo. De acordo com o LNEC (11), o valor de cálculo da condutibilidade térmica do vidro plano é 1 W/m°C.

Coeficiente de transmissão térmica

O controlo do desempenho térmico dos edifícios é cada vez mais apertado e em relação aos vãos envidraçados, esse controlo passa pela exigência de valores cada vez mais baixos para o coeficiente de transmissão térmica (U [W/m2°C]) calculado de acordo com a equação seguinte (prevista na NP EN 673):

$$U = \frac{1}{R_{s,i} + R_{s,e} + R_{ar} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \cdots + \frac{e_n}{\lambda_n}} \quad \textbf{Eq. 8}$$

Onde, $R_{s,i}$ é o valor da resistência térmica superficial interior [m²°C/W]; $R_{s,e}$ é o valor da resistência térmica superficial exterior; R_{ar} é a resistência térmica do ar (diferente de 0 apenas no caso de vidros multipanos); e_n é a espessura em metros do pano n; λ_n é a condutibilidade térmica do pano *n*. Na Tabela 6 pode-se comparar os diferentes valores de U em função da solução adoptada.

Tabela 6 – Coeficiente de transmissão térmica de: vidro monolítico de 6 mm, vidro laminado de 2x6 e vidro duplo de dois panos de 6 mm e caixa-de-ar de 12 mm.

DADOS*		Tipologia	6	6.2	6.2x12
$R_{s,i}$ $[m^{2\circ}C/W]$	0,13	U [W/m2°C]	5,7	5,5	3,0
$R_{s,e}$ $[m^{2\circ}C/W]$	0,04				
R_{ar} $[m^{2\circ}C/W]$	0,15				
λ [W/m°C]	1				

*Dados do LNEC (11) para um sentido de fluxo de calor horizontal.

Os vidros duplos são separados por espaçadores normalmente feitos em alumínio, que apresentam a dupla função de acomodar tensões resultantes das variações térmicas e de barreira anti-vapor, evitando o fenómeno de condensação no interior do vidro. Entre os dois ou mais panos, existe uma caixa-de-ar que é preenchida normalmente com gases raros (árgon, xénon ou crípton), com maior resistência térmica.

Radiação Solar

A radiação solar que atinge a superfície da Terra pode-se decompor em três, em função do comprimento de onda. A radiação ultravioleta (de pequeno comprimento de onda), a visível e a infravermelha (grande comprimento de onda). A grande parte da energia está contida nesta última

[2] Valor fornecido pelos fabricantes e determinado sob condições específicas.

(Figura 31), pelo que é importante criar soluções que impeçam a sua entrada sem reduzir a transmissibilidade do espectro visível.

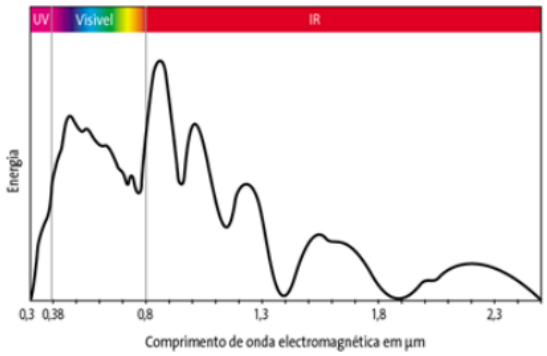


Figura 31 - Espectro do raio solar, EN 410.

Factor solar

O factor solar, g, é o quociente entre o somatório da radiação transmitida com radiação reemitida (o vidro absorve parte da radiação incidente e como qualquer corpo emite radiação) sobre a radiação incidente no vidro. Este parâmetro é extremamente importante na avaliação do comportamento térmico do vidro, que é tanto melhor quanto mais baixo for.

Efeito de estufa

Como dito anteriormente, qualquer corpo emite radiação. A radiação solar (particularmente radiação infravermelha) ao entrar no interior do edifício aquece os objectos no seu interior, sendo que estes, derivado o aumento de temperatura, emitem radiação na zona infravermelha com um comprimento de onda superior a 5 µm. Como o vidro é praticamente opaco a radiação com este comprimento de onda, esta acaba por ficar retida contribuindo para o aumento da temperatura no interior.

Uma forma de reduzir este sobreaquecimento passa pela utilização de vidros de controlo solar, isto é, vidros que apenas transmitem uma determinada fracção da radiação solar e que asseguram simultaneamente a iluminação, limitando assim o aquecimento dos espaços interiores. Os vidros de controlo solar recorrem a revestimentos de baixa emissividade que são predominantemente transparentes à luz visível mas ao mesmo tempo capazes de reduzir significativamente a emissividade para a radiação infravermelha.

Se o revestimento for aplicado no exterior, durante o Verão reduz a quantidade de radiação IV que entra para os edifícios, diminuindo as necessidades de arrefecimento. Para diminuir as perdas durante o Inverno, pode ser possível recorrer a uma solução mais completa, como se mostra na Figura 32, já que no caso dos vidros de multipanos pode-se aplicar igualmente o revestimento no pano interior de modo a reflectir a radiação infravermelha emitida pelos objectos existentes no interior do edifício, que aquecem com a passagem da radiação visível.

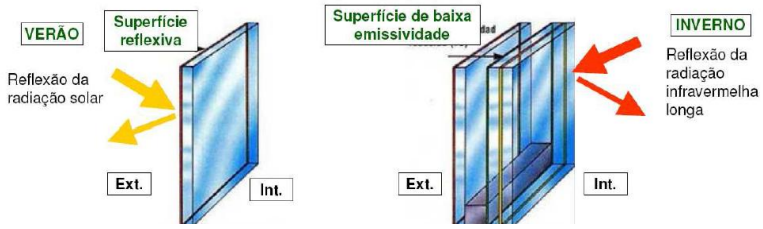


Figura 32 - Vidros de controlo solar (adaptado de (24)).

Balanço energético

O balanço energético é dado pela diferença entre as perdas térmicas e os ganhos solares úteis. As perdas térmicas que ocorrem através de um vidro são função do coeficiente U, enquanto os ganhos solares são função do factor solar g.

Durante a estação de aquecimento (Inverno), as perdas térmicas de um determinado objecto podem ser estimadas de acordo com a equação seguinte:

$$Q = 0{,}024.U.A.GD \quad [W] \qquad \textbf{Eq. 9}$$

Onde A é a área do elemento, GD é o número de graus.dias de aquecimento, especificados para cada concelho do país e U é o coeficiente de transmissão térmica.

Já os ganhos térmicos são determinados de acordo com:

$$Q = G_{sul}.\sum_{j}\left[X_j.0{,}46.A_j.g\right].M.\eta \qquad \textbf{Eq. 10}$$

Onde G_{sul} representa em W/m²°C o valor médio mensal da energia solar média incidente[3] numa superfície vertical orientada a sul de área unitária durante a estação de aquecimento, X_j é o factor de orientação, M é (em meses) a duração da estação de aquecimento e η o factor de utilização dos ganhos térmicos.

3.5.2 – Exigências acústicas

O som é o resultado de uma perturbação física da pressão em relação à pressão atmosférica ($10^5 Pa$), que pode ser detectada pelo ouvido humano dependendo da frequência da onda (Figura 33). As frequências audíveis pelo ser humano estão compreendidas entre os 20Hz e os 20000Hz.

[3] Durante a estação de aquecimento, o Sol está mais baixo e consequentemente a incidência solar é superior nos paramentos verticais, podendo originar a sua rotura.

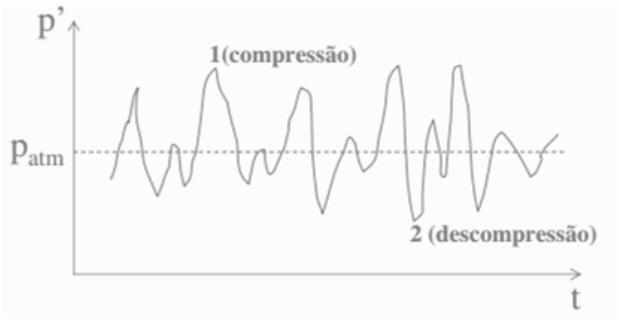


Figura 33 - Perturbação da pressão do ar devido a uma onda sonora (12).

A pressão sonora *p* é dada por:

$$p = p' - p_{atm} \quad \textbf{Eq. 11}$$

Em termos de cálculo, é importante determinar a pressão média num dado intervalo de tempo e não a pressão instantânea. Essa pressão é denominada de pressão eficaz, e é determinada através da média quadrática, já que a média simples poderia conduzir a um valor nulo onde as pressões negativas anulassem as positivas. Assim sendo, tem-se:

$$p_{ef}{}^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} * \int_{t_1}^{t_2} p(t)^2 . dt \quad \textbf{Eq. 12}$$

A pressão sonora relaciona-se com outras grandezas acústicas igualmente importantes, como a potência, a intensidade e a densidade de energia sonora.

A potência, *P*, é igual à energia emitida por unidade de tempo [*W*].

A intensidade, *I*, é igual à quantidade de energia por unidade de tempo que atravessa perpendicularmente um elemento com uma dada área [*W/m²*].

A densidade de energia sonora é dada por

$$\epsilon = \frac{p^2}{\rho . c}, \quad (J/m^3) \quad \textbf{Eq. 13}$$

Onde *c* é a velocidade do som e *ρ* é o peso volúmico das partículas do ar.

Devido à escala extremamente ampla da gama de pressões sonoras, é mais cómodo a utilização de uma escala logarítmica, denominada por escala dos decibéis (dB). A escala de decibéis é um nível que mede a diferença entre duas grandezas (normalmente faz-se comparar um determinado valor, *G*, com o valor de referencia G_0), onde habitualmente essas grandezas são o nível de intensidade sonora, o nível de pressão sonora e o nível de densidade de energia sonora.

$$L(G) = 10 * \log_{10}(\frac{G}{G_0})$$ **Eq. 14**

Na tabela seguinte apresentam-se os valores típicos do nível de pressão sonora de actividades correntes:

Tabela 7 – Níveis de pressão sonora característicos de actividades correntes (adaptado de (12)).

Situação	L(p) [dB]
camiões pesados	90
rua com tráfego pesado	85
rua com tráfego leve	50
escritório ruidoso	65
escritório normal	45
residência sossegada (dia)	50
residência sossegada (noite)	40
quarto (noite)	25

A onda sonora, tal como a radiação solar, ao atravessar um determinado material é em parte reflectida, absorvida e transmitida (Figura 34). Em relação a um determinado material, é importante saber o seu índice de redução sonora *R*,

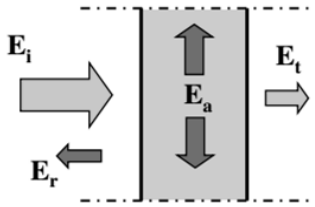


Figura 34 - Decomposição da energia sonora incidente (12)).

$$R = L(\epsilon_i) - L(\epsilon_t)$$ **Eq. 15**

Factores como a rigidez, a ressonância ou a massa de um determinado material são extremamente importantes para o mecanismo de transmissão do som através do material. Segundo Rodrigues (12), no caso do vidro, é a massa o factor preponderante, e pela Lei das massas:

$$R = 20 * \log_{10}(f.m) - 43dB$$ **Eq. 16**

Sendo 'm' e 'f' a massa superficial do elemento (kg/m²) e a frequência (Hz) do som incidente respectivamente. A equação diz-nos que se aumentarmos a massa para o dobro, ou seja a espessura, consegue-se reduzir em 6dB o som transmitido (Figura 35).

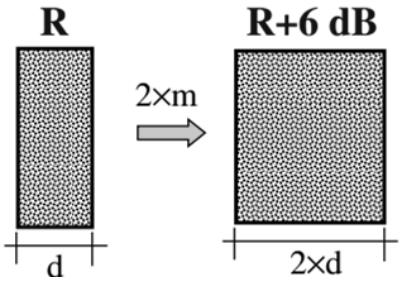


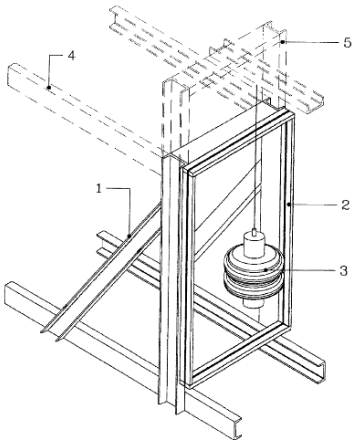
Figura 35 - Relação da massa do material com a redução sonora (12).

Qualquer lâmina de qualquer material tem uma frequência crítica em que é mais susceptível de começar a vibrar. Se o som for emitido na frequência crítica da lâmina, a transmissão do ruído faz-se mais facilmente, por exemplo no caso do vidro, o nível de isolamento acústico pode baixar 10 a 15 dB. De acordo com a *SaintGobain Glass* (13) um vidro de 4 mm de espessura tem uma frequência crítica de 3000 Hz, enquanto num vidro de 12 mm de espessura, essa frequência situa-se nos 100Hz. Uma forma de aumentar a redução acústica passa pela utilização de vidros duplos assimétricos, que pelo facto de terem diferentes espessuras possuem diferentes frequências críticas.

3.5.3 – Segurança

Resistência ao impacto

Sempre que for requerido a utilização de vidro de segurança, tem de ser garantida a resistência ao impacto. O ensaio deve ser feito de acordo com a EN 12600 e consiste em fazer embater um pêndulo de 50 kg perpendicularmente ao pano de vidro (Figura 36), seguindo-se a classificação em função do desempenho do vidro no teste. A classificação é feita conforme a altura em que é largado o pêndulo. Existem três níveis de classificação conforme o indicado na Tabela 8.



1 – Pórtico principal

2 – Moldura de fixação

3 – Pêndulo

4 – Estrutura de suporte opcional

5 – Dispositivo de suspensão opcional

Figura 36 - Ensaio de resistência ao impacto segundo a EN 12600.

Tabela 8 - Classificação do ensaio de resitência ao impacto segundo a EN12600.

Classificação	altura de queda (mm)
3	190
2	450
1	1200

Protecção contra o ataque manual, vandalismo e intrusão

Os vidros devem ser avaliados e classificados conforme a sua resistência ao ataque manual, vandalismo e a intrusão de acordo com a Tabela 9. A norma contempla dois tipos de testes:

A. Queda de uma bola de aço de 4,1 kg e 100 mm de diâmetro, onde cada teste tem de resistir a três impactos. A classificação é feita em função da altura de queda.
B. Embate sucessivo de um machado no vidro. A classificação é feita em função do número de pancadas necessárias para criar uma abertura de 400x400 mm.

Tabela 9 - Classificação do vidro contra o ataque manual, vandalismo e intrusão segundo a EN 356.

Classificação	Altura de queda	Número de impactos
P1A	1500	3
P2A	3000	3
P3A	6000	3
P4A	9000	3
P5A	9000	9
P6B	-	30 a 50
P7B	-	51 a 70
P8B	-	mais de 70

Protecção contra armas de fogo

Sempre que requerido os vidros devem ser classificados face à sua resistência a armas de fogo de acordo com a EN1063. O teste consiste no disparo de três tiros excepto no teste de classe SG1 (arma de caça) onde apenas é disparado um tiro. A distância do disparo varia entre os 5 e os 10 m em função da classificação. As classes de resistência dependem do tipo de arma utilizada pelo que se aconselha a consulta da norma. As zonas de impacto dos disparos devem formar um triângulo, separados de 120 mm entre si.

Explosões

A exigência de resistência face a explosões é cada vez mais requerida, nomeadamente em edifícios de elevado valor social, económico ou político (4). A regulamentação europeia classifica através da EN13541 a resistência a explosões, simulando explosões de 25kg a 100 kg de TNT a uma distancia de 35 a 50 m. A pressão exercida sobre o vidro é função da distância a que a detonação é feita do mesmo. A classificação é feita de acordo com a Tabela 10.

Tabela 10 - Classificação da resistência do vidro ao ensaio de explosão segundo a EN 13541.

Classificação	Pressão reflectida [kPa]
ER 1	50 a 100
ER 2	100 a 150
ER 3	150 a 200
ER 4	200 a 250

3.5.4 – Segurança contra incêndios

Relativamente à segurança face ao fogo é necessário distinguir dois conceitos distintos, a reacção ao fogo dos diversos materiais de acordo com a EN 13501-2 e a resistência face ao fogo segundo a mesma norma.

Reacção ao fogo

A classificação dos diversos materiais utilizados na construção é dividida em cinco categorias:

M0 – Incombustível por natureza ou por experiencia
M1 – não inflamável
M2 – dificilmente inflamável
M3 – moderadamente inflamável
M4 – facilmente inflamável

Resistência ao fogo

A EN 1991-1-2 define como principais características:

- *"Estanqueidade (E) – Capacidade de um elemento de compartimentação de um edifício, quando exposto ao fogo, de um lado, para impedir a passagem de chamas e de gases quentes através de si e para impedir a ocorrência de chamas no lado não exposto."*

- *"Isolamento térmico (I) – Capacidade de um elemento de compartimentação de um edifício, quando exposto ao fogo de um lado, para limitar o aumento de temperatura da face não exposta abaixo de valores especificados."*
- *"Função de resistência estrutural (R) – Capacidade de uma estrutura ou de um elemento para resistir a acções específicas durante o incêndio relevante, de acordo com um critério definido."*

Podem ainda ser exigidos critérios opcionais ou complementares, por exemplo o critério *W* onde se controla o fluxo térmico máximo que atravessa o vidro, e *kW/m².*

Existem três tipos de comportamentos que podem ser exigidos a um determinado material e que possuem critérios próprios (Tabela 11).

Tabela 11 - Categorias e exigências de resistência ao fogo segundo a EN 13501.

Categoria	Designação	Critério(s)
EF	Estabilidade ao fogo	R
PC	Pára-chamas	E e/ou W
CF	Corta-fogo	E e I

A verificação da resistência ao fogo é normalmente feita no domínio do tempo, informação que se pode consultar nas fichas técnicas dos produtos dos fabricantes. Como critério de segurança tem-se:

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ} \quad \textbf{Eq. 17}$$

Onde,

$t_{fi,d}$, é o valor de cálculo da resistência ao fogo;

$t_{fi,requ}$ é o tempo requerido de resistência ao fogo.

O vidro recozido é de acordo com Wood (14), pouco aconselhável na concepção de sistemas resistentes ao fogo, devido essencialmente ao choque térmico e às tensões geradas pelo aumento de temperatura, capazes de originar a rotura do vidro em poucos minutos (5min a 12min). Temperaturas à volta dos 80°C podem ser o suficiente para fragmentar o vidro. O autor refere ainda que vidro temperado quando exposto ao fogo pode sofrer relaxação do efeito da têmpera obtido durante o processo de fabrico, podendo originar a sua rotura.

Existem no mercado diversos produtos que cumprem os requisitos de resistência ao fogo, e geralmente são soluções de vidro laminado, onde os panos de vidro são colados com uma película intumescente que em caso de incêndio:

- Torna-se opaca

- Absorve o calor
- Isola o compartimento não exposto ao fogo
- Baixa o calor irradiado níveis toleráveis
- Mantém a estrutura compacta e resistente ao fogo.

4 – Exemplos práticos

4.1 – Fachada suportada por *Glass fins*

4.1.1- Nota introdutória

As sucessivas tentativas de redução do impacto visual criado pelas estruturas de suporte das fachadas (normalmente em aço), tem feito com que esta tipologia estrutural tenha ganho recentemente alguma notoriedade junto dos projectistas de fachadas (Figura 37). A *glass fin* é uma viga de reduzida espessura composta por vidros laminados colados com polímeros, que pode ser colocada na vertical (para suporte de paramentos verticais) ou na horizontal (no caso das coberturas). A sua reduzida espessura permitiu expandir o campo de aplicação das vigas de vidro, na medida em que oferece a possibilidade de acoplar dois ou mais troços, permitindo ultrapassar a limitação da extensão máxima produzida em fábrica (11 metros)[4].

Figura 37 - Entrada principal com fachada suportada por *glass fins*, Apple Store em Nova Iorque (2).

As emendas, zonas onde se acoplam os diferentes troços, são geralmente executadas com recurso a réguas metálicas aparafusadas duas a duas (Figura 38 e Figura 39). A fragilidade do vidro faz com que, ao contrário do que acontece nas estruturas metálicas, a concepção destas emendas seja feita de uma forma mais rigorosa e cuidada, dada a incapacidade do vidro de redistribuir as tensões provenientes dos parafusos, originando elevados níveis de tensão.

Com o objectivo de demonstrar como se deve dimensionar uma fachada de um edifício suportada por *glass fins*, é analisado um exemplo prático onde são explicadas as principais condicionantes e os seus efeitos na análise do mesmo.

[4] Normalmente os vidros apresentam a dimensão máxima de 6 metros, podendo no entanto ser produzido com dimensão até 11 metros em casos excepcionais.

Na Figura 40 está representado o primeiro caso de estudo onde se pretende dimensionar as *glass fins* que suportam a fachada de vidro com 15 metros de altura. As vigas são simplesmente apoiadas no topo e na base. No apoio da base, a reacção vertical é libertada de modo a evitar esforços de compressão que pudessem potenciar eventuais problemas de instabilidade. Dada a extensão da viga, é necessário efectuar uma emenda já que cada troço não pode ter mais de 11 metros. Relativamente ao dimensionamento da emenda, é estudado o tipo de material a utilizar no preenchimento das folgas, o local onde deve ser executada (relação a/L) e o número óptimo de parafusos a utilizar.

Figura 38 - *Glass fin*, Fundação Champalimaud, Lisboa.

Figura 39 – Pormenor da emenda, Fundação Champalimaud.

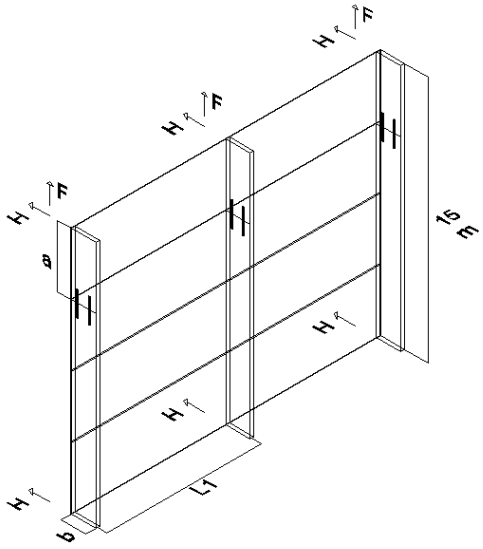


Figura 40 - Caso de Estudo 1 - Fachada suportada por *glass fins*.

A natureza estrutural das *glass fins* obriga a que estas sejam compostas por vidro laminado, dada as suas vantagens (capitulo 2). Sendo o comportamento do vidro laminado dependente do fluxo de corte que é transmitido entre as diversas camadas que constituem a secção transversal, torna-se imprescindível estudar o desempenho das películas utilizadas na colagem dos vidros bem como a sua influência no comportamento global da peça.

A secção transversal da viga é composta por quatro vidros de 15 mm de espessura. Tanto nas emendas como nos apoios são realizados furos de 40 mm de diâmetro, onde se introduzem parafusos M30 (como se verifica adiante). As réguas localizadas na emenda e as chapas dos apoios,

são geralmente em aço inox S220 e têm uma espessura de 15 mm. A geometria da emenda e dos apoios[5] (Figura 41 e Figura 42) cumpre o regulamentado nas normas EN12150 e EN1863 (anexo II).

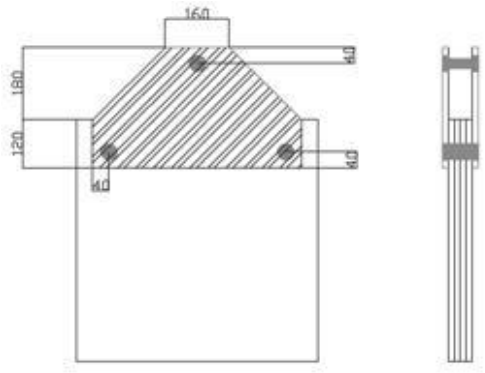


Figura 41 - Pormenor da ligação de topo.

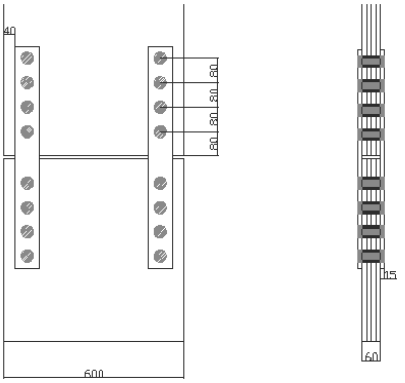


Figura 42 - Pormenor da ligação intermédia.

4.1.2 – Escolha de materiais

Relativamente ao tipo de vidro, cabe ao engenheiro escolher a melhor solução sendo que essa escolha deve ser feita de uma forma ponderada, avaliando os prós e os contras de cada solução. Dada a natureza estrutural do elemento e a função para a qual é concebido, é importante que haja um compromisso entre resistência mecânica e comportamento pós-rotura. Deste modo, escolheu-se uma solução combinada de vidros temperados (mais resistentes) com vidros termoendurecidos (melhor comportamento pós rotura que o vidro temperado), dispostos intercaladamente.

A colagem dos vidros pode ser realizada com *SentryGlasPlus* ou com PVB. Sendo o primeiro bastante mais dispendioso e, por isso, geralmente utilizam-se películas de PVB recorrendo apenas ao SGP quando a segurança à encurvadura lateral pode estar em causa. Dada a dimensão da *glass fin* em estudo utiliza-se vidros colados com SGP por razões de rigidez ao bambeamento. A Figura 43 traduz a diferença de comportamento entre duas vigas simplesmente apoiadas, secção transversal 600x60 (4 vidros de 15 mm) com um vão de 15 metros, uma colada com PVB e a outra colada com SGP. A maior rigidez do primeiro traduz-se em maiores cargas criticas ao bambeamento.

[5] A ligação na base é idêntica à ligação no topo, sendo apenas diferente o furo do cavilhão (ovalizado para libertar reacção vertical).

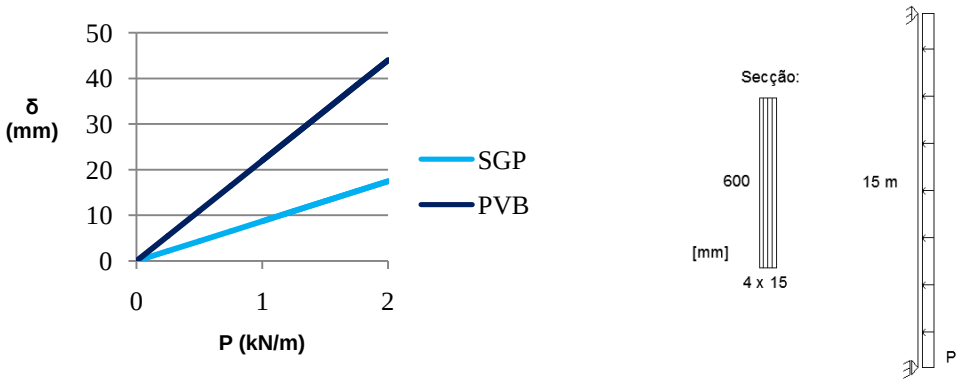


Figura 43 - Gráfico carga/deslocamento de vigas laminadas coladas com PVB e SGP.

Quando o vento carrega a *glass fin*, gera-se um campo de tensões normais e tensões tangenciais devido aos esforços instalados. Na zona da emenda, estas tensões são transmitidas através dos parafusos, e como o vidro é incapaz de plastificar, essa transmissão origina um aumento da tensão local, sendo por isso inevitável controlar a tensão máxima (σ_{max}) instalada no vidro Figura 44.

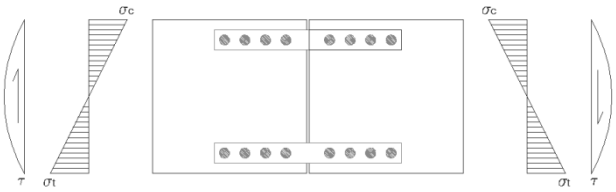


Figura 44 - Tensões na emenda devido às cargas actuantes.

O desempenho dos materiais utilizados no preenchimento das folgas foi simulado em modelo de elementos finitos (SAP2000) para melhor se compreender o efeito que uma eventual modelação mal concebida pode causar. Analisou-se uma *glass fin*[6] onde foram modelados dois comportamentos distintos, no primeiro (Figura 45), considerou-se que toda a envolvente do parafuso contribuía para a transmissão de tensões enquanto no segundo considerou-se apenas parte dessa envolvente (menos de metade da envolvente total, Figura 46). Os resultados obtidos foram esclarecedores, tendo-se verificado um acréscimo de tensão do primeiro para o segundo modelo de aproximadamente 15 MPa (no anexo III encontra-se o modelo de elementos finitos tipo, bem como a explicação detalhada da zona da ligação)

[6] Os resultados foram obtidos para uma *glass fin* com 16 parafusos na emenda (colocada a 4 metros do topo da viga) de 600x60 mm, colada com SGP e para um afastamento de 3,0 m.

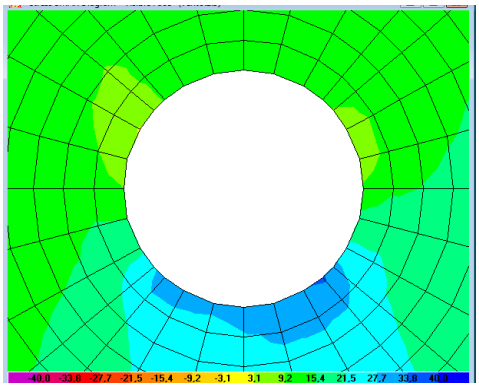


Figura 45 - Simulação do comportamento da solução com silicone $\sigma_{max} = 41,8\ MPa$

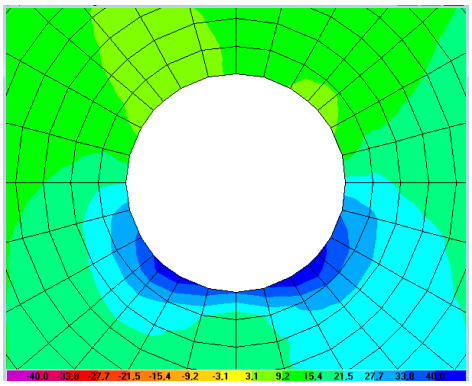


Figura 46 - Simulação do comportamento da solução tradicional $\sigma_{max} = 57,4\ MPa$.

4.1.3 – Número de parafusos na emenda

As ligações aparafusadas têm a desvantagem de amplificar, especialmente em materiais frágeis, as tensões na sua envolvente, sendo por isso relevante estudar a evolução das mesmas em função do número de parafusos que compõem a ligação. Neste trabalho apresentam-se soluções com 8, 12, 16, 20 e 24 parafusos, ou seja, 2, 3, 4, 5 e 6 parafusos por meia régua[7] (Figura 47). Para a modelação de elementos finitos foi necessário considerar algumas hipóteses, para além das já discutidas, tendo-se optado por:

- Afastamento $L_2 = 3\ m$ entre *glass fins;*
- Emenda realizada a 4 metros do topo da viga com furos de 40 mm de diâmetro;
- Pressão característica do vento *Wk=1,5 kPa.*

Os resultados obtidos constam no gráfico da Figura 48 e no anexo III. O gráfico evidencia uma tendência espectável de diminuição da tensão de pico à medida que se aumenta o número de parafusos, estabilizando para a solução com 4 parafusos. A introdução de mais parafusos é assim ineficiente, uma vez que não se traduz numa diminuição da tensão máxima, para além dos custos acrescidos na concepção.

Salienta-se ainda o facto de esta análise ser meramente ilustrativa do que se pretende provar, visto que em nenhum dos casos apresentados no gráfico (Figura 48) a tensão é inferior ao admissível, consequência dos pressupostos assumidos (b=600mm e l=3m) como se comprovará adiante.

[7] Entende-se por meia régua, a zona da régua metálica que está em contacto com apenas um dos dois troços que compõem a viga.

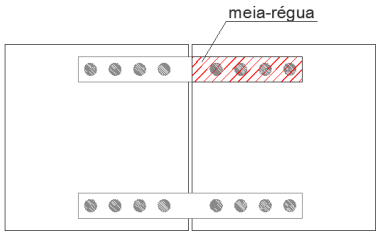


Figura 47 - Pormenor da emenda (meia-régua).

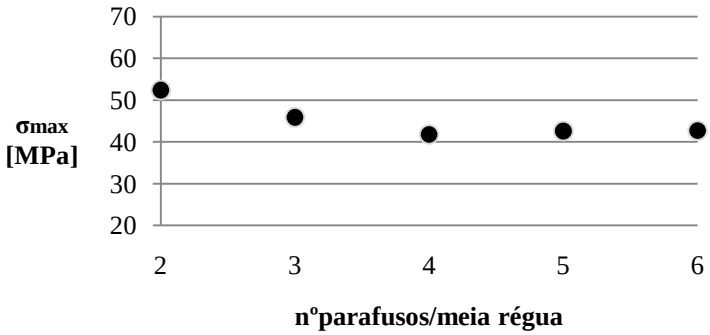


Figura 48 - Gráfico tensão máxima no vidro/número de parafusos.

4.1.4 – Zona da emenda, relação *a/L*

As ligações devem ser feitas de modo a produzir o menor nível de tensões possível. No caso de vigas simplesmente apoiadas, é natural que essa ligação deva estar o mais longe possível do meio vão (momento flector máximo). Com o objectivo de estudar a evolução do estado de tensão em torno do furo mais solicitado e em função da sua localização na viga, fez-se variar a relação *a/L (*Figura 50) - *a* distância em metros do topo da viga à zona da emenda e *L* comprimento em metros da viga (*L=15m*). O gráfico da Figura 49 resume os resultados obtidos (disponíveis no anexo III) com base nos pressupostos assumidos no ponto anterior, assume-se ainda que o número de parafusos que compõem a ligação são 16 (4 parafusos por meia régua). Os resultados demonstram uma evolução nítida da tensão ($\sigma_{\max}$) na viga até meio vão, convergindo aí para o seu valor máximo. O modo como a tensão evolui é independente do número de parafusos que compõem a ligação, embora no gráfico esteja apenas presente a curva correspondente ao caso de 16 parafusos. De salientar o facto de que em caso algum se registou uma tensão máxima no vidro junto aos bordos de furação inferior à tensão máxima a meio vão. Não são apresentados resultados para relações a/L superiores a 0,5, pela óbvia simetria do gráfico. Do mesmo modo, os resultados resultam de alguns pressupostos assumidos que invalidam a utilização prática das vigas estudadas, porém em nada prejudica a qualidade da análise nem o seu objectivo.

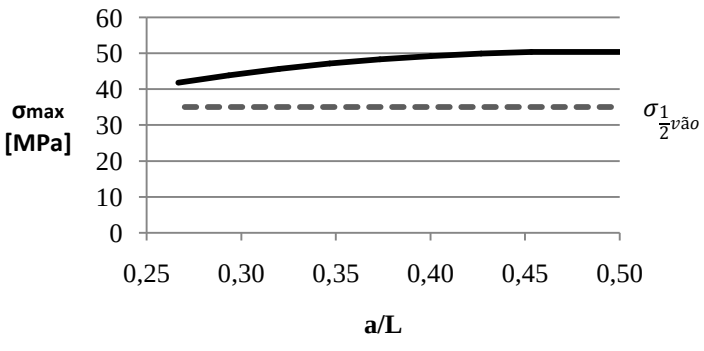


Figura 49 - Evolução da tensão máxima no bordo do furo condicionante face à variação da relação a/L.

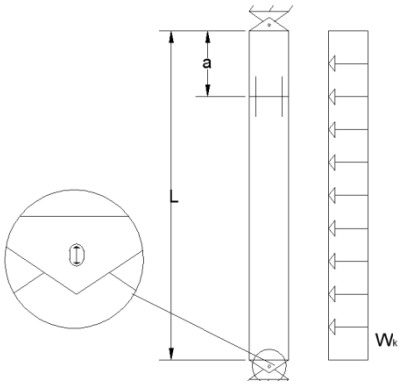


Figura 50 - *Glass fin* - modelo estrutural.

4.1.5 – Afastamento entre *Glass fins*

O afastamento entre *glass fins* deve ser optimizado, não apenas por questões económicas, mas também por questões estéticas. Por essa razão, esta secção pretende testar os limites para os quais as *glass fins* verificam a segurança de acordo com as normas existentes.

Neste ponto, e depois do que foi estudado nos anteriores, são apenas testadas vigas com 16 parafusos na emenda e situada a 4 metros do topo da viga.

4.4.5.1 – Verificação da tensão máxima

A tensão máxima para um vidro termoendurecido colocado na vertical é limitada a 35 MPa na NF DTU 39 P3 e a 36,5 MPa na ASTM E1300 – 09a.

O gráfico da Figura 51, descreve o andamento da tensão máxima de três tipos de viga (para b=600 mm; b=700 mm e b=800 mm) em função do afastamento L_2 entre *glass fins* para uma força do vento de *1,5 kPa* (pressão ou sucção)

Note-se que para a viga de 700 mm de altura e para um afastamento de 3,25 m, tem-se uma tensão de 35,2 MPa, não cumprindo a norma francesa, pelo que se adopta a solução com um afastamento inferior[8] (3 m).

Aqui, a escolha da solução a adoptar dependerá de uma análise custo/beneficio, entre os encargos adicionais inerentes às soluções com maior afastamento e a qualidade estética da solução, o que embora não fazendo parte do âmbito deste projecto (e por isso se analisam soluções respeitantes aos três casos), é possível concluir à partida que a viga com altura de 800 mm poderá ainda ser optimizada, porém, o painel de fachada apresentará deformações excessivas.

As soluções que se são analisadas nas secções seguintes são:

- Solução A – $b = 600\ mm$ e $L_1 = 2500\ mm$
- Solução B – $b = 700\ mm$ e $L_1 = 3000\ mm$
- Solução C – $b = 800\ mm$ e $L_1 = 3500\ mm$

[8] Foram apenas testados afastamentos de 2,00; 2,25; 2,50; 2,75; 3,00; 3,25; 3,50 metros.

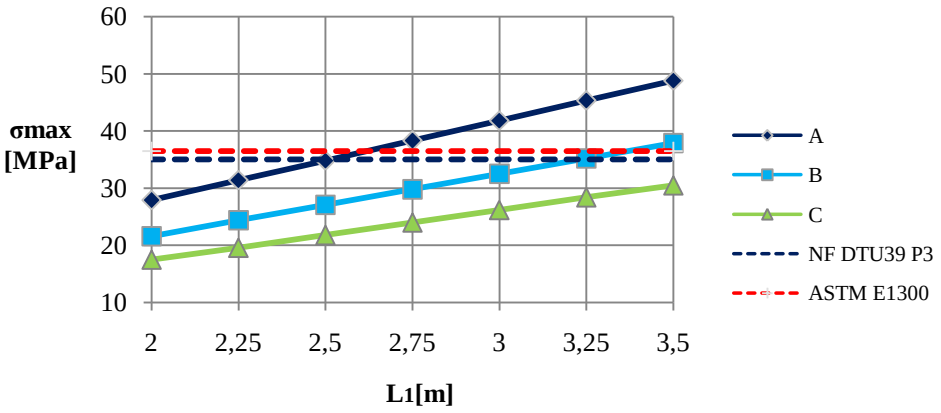


Figura 51 - Gráfico tensão máxima no vidro/afastamento entre *glass fins*.

4.4.5.2 – Deformações

A norma americana estipula como deformação máxima admissível para a estrutura de suporte dos vidros utilizados em fachadas de L/175, já a norma francesa, limita a deformação a L/150, pelo que nenhum dos casos este critério se revela condicionante como se pode consultar na Tabela 12.

Tabela 12 - Deformação máxima das *glass fins*.

Solução	δ [mm]	L/δ
A	35,1	427
B	26,6	564
C	20,9	718

4.4.5.3 - Análise à encurvadura lateral

A verificação de segurança ao fenómeno de encurvadura lateral foi feita através de modelos de elementos finitos ("*buckling analysis*"), analisando o factor de carga crítica do modo fundamental. A Figura 52 ilustra as deformadas do primeiro modo de encurvadura e a Tabela 13, resume os resultados obtidos.

$$|F_{seg}| = \frac{carga\ critica\ 1º modo}{carga\ actuante} > 1 \qquad \textbf{Eq. 18}$$

Tabela 13 - Verificação de segurança à encurvadura lateral.

Solução	Fseg
A	-10,9
B	-10,3
C	-9,4

O sinal negativo indica que o modo de instabilidade corresponde a uma carga que actua no sentido contrário ao arbitrado, o que neste caso significa que estamos perante forças de sucção. Para um carregamento correspondente a uma pressão do vento (como arbitrado no modelo), a zona da secção transversal comprimida situa-se no bordo que está em contacto com a fachada que por sua vez serve de contraventamento (Figura 53 - I), já no caso das forças de sucção, a zona comprimida não está contraventada, sendo susceptível de instabilizar (Figura 53 - II).

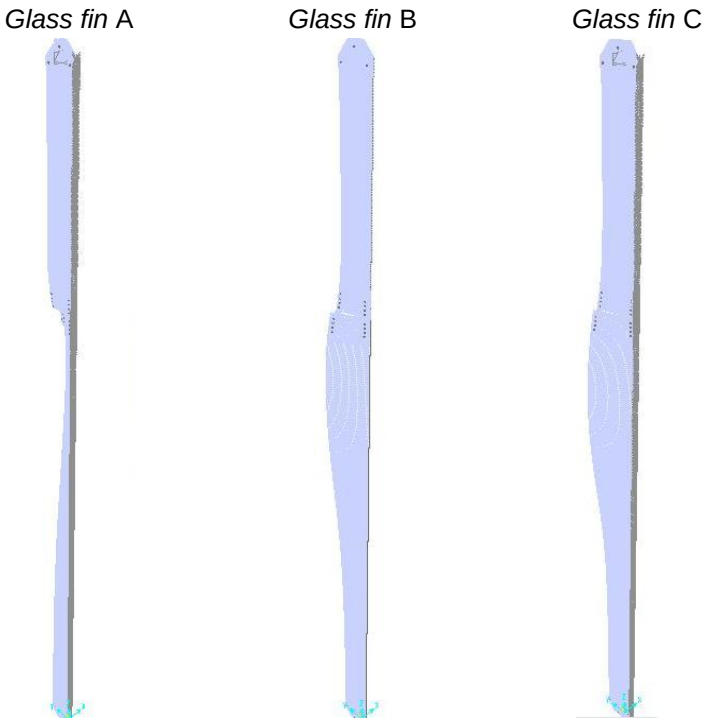


Figura 52 - 1ºModo de encurvadura - Solução A, B e C.

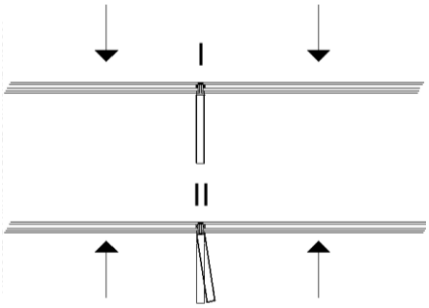


Figura 53 - Encurvadura lateral. I - Pressão; II - Sucção.

4.4.5.4 – Verificação de segurança das ligações

Para a verificação de segurança das ligações utilizaram-se os resultados obtidos nos modelos numéricos, tendo-se majorado o vento por 1,5. Tanto as ligações de extremidade como a ligação intermédia funcionam essencialmente ao corte. Na Figura 54 está representado o esquema de transmissão de forças. Simplificadamente e conservativamente considera-se que o parafuso é uma barra simplesmente apoiada nas chapas e uniformemente carregada pela *glass fin*.

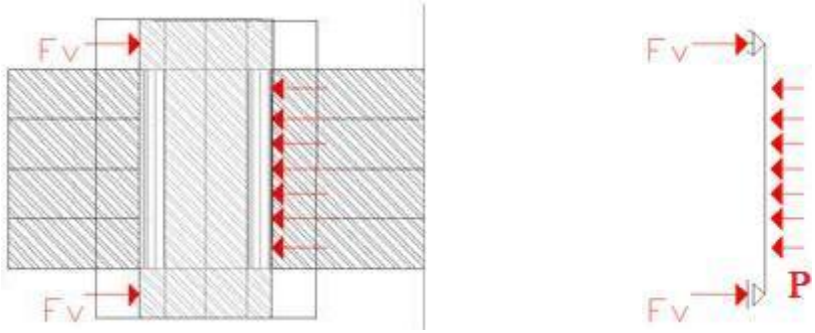


Figura 54 - Corte no parafuso.

Para a solução A, o resultado obtido para o esforço de corte no parafuso foi de aproximadamente 42 kN. Considerando que o vão L_p está compreendido entre os alinhamentos dos centros de massa das chapas ($L_p = 60 + 2 * 7{,}5$) e para um parafuso M30, tem-se:

$$P = \frac{2 * F_v}{L'} = 2 * \frac{42}{0{,}060} = 1400\ kN/m$$

$$M = 1400 * \frac{0{,}075^2}{8} = 0{,}984\ kNm$$

O parafuso é modelado como uma peça linear e a tensão de comparação é determinada pelo critério de Von Mises. À zona de momento flector máximo corresponde um esforço transverso nulo, pelo que a tensão de comparação é igual à tensão normal. Para secções circulares tem-se:

$$\sigma_{comp} = \frac{M}{I} * r = \frac{M * r}{\pi * \frac{r^4}{4}} = 0{,}984 * \frac{0{,}015}{\pi * \frac{0{,}015^4}{4}} = 371{,}2\ MPa\ < 500\ MPa$$

Nas chapas, a tensão de comparação máxima é 206 MPa < 220 MPa., de acordo com a Figura 55 e Figura 56.

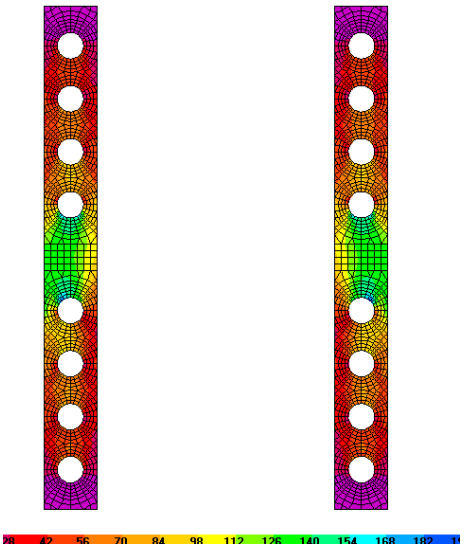


Figura 55 - Tensão de comparação nas réguas metálicas ($\sigma_{comp} = 206\ MPa$)

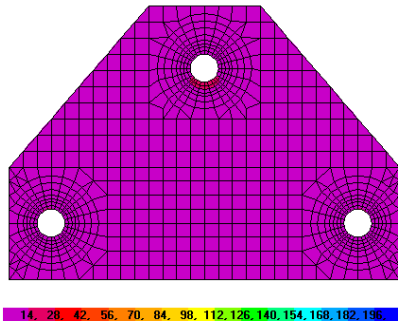


Figura 56 - Tensão de comparação na chapa do apoio superior ($\sigma_{comp} = 23,8\ MPa$).

Na zona da emenda constatou-se que a tensão máxima no vidro é em torno do parafuso mais afastado da junta, enquanto o parafuso mais solicitado é o mais próximo. Quando a viga é carregada, os dois segmentos de vidro tendem a separar-se, sendo esse movimento impedido pelos parafusos e pelas chapas. Os primeiros parafusos são sujeitos a maior força de corte, diminuindo progressivamente à medida que o afastamento à junta aumenta. Porém, na transição para o último parafuso há um aumento considerável de esforço de corte que, juntamente com o campo de tensões já instalado origina aí a tensão máxima no vidro. A tensão na chapa vai sendo distribuída pelos vários parafusos até que, quando chega ao último, já não existem mais parafusos por onde transmitir tensões, descarregando a restante tensão exclusivamente no último parafuso. À medida que se aumenta o número de parafusos, naturalmente que o esforço de corte em cada um deles diminui, pelo que a única explicação encontrada para que a tensão máxima no vidro se mantenha aproximadamente constante com o aumento do número de parafusos é devido ao campo de tensões criado pelo proximidade a outros parafusos e às cargas aplicadas.

4.2 – Painel de fachada – Vidros duplos

4.2.1 – Nota introdutória

A fachada de um edifico representa a fronteira entre o espaço interior e o exterior, que se pretende que seja capaz de conservar o interior sob determinadas condições de conforto, perante as ameaças de destabilização proveniente do ambiente exterior. Como consequência, é assim exigido, que os vidros que compõem a fachada cumpram determinados parâmetros acústicos e térmicos durante todo o período de vida útil, obrigando a que estes sejam duplos ou triplos em alguns casos.

Uma outra condicionante, também já abordada no capítulo 3, é a questão da segurança de pessoas e equipamentos. A norma inglesa BS EN 12543-2, para além de outros requisitos (alguns deles já abordados neste documento), obriga que o vidro de segurança seja laminado, pelo que tipicamente se tem de vidro duplo onde um dos panos é laminado.

Para efeitos de cálculo estrutural considera-se que o vidro duplo comporta-se como um único elemento. Quando um dos panos é carregado deforma-se e uma vez que o gás no interior da caixa-de-ar está selado, assume-se que não existe variação volumétrica (incompressibilidade do gás), consequentemente o outro pano terá que se deformar na mesma medida para que o volume da caixa-de-ar se mantenha constante Figura 57.

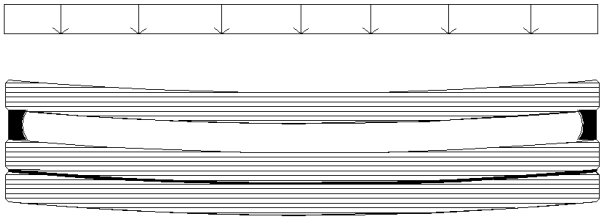


Figura 57 - Deformada de um vidro duplo carregado perpendicularmente ao plano.

A equação que rege o comportamento dos gases perfeitos é:

$$PV = nRT \qquad \textbf{Eq. 19}$$

onde,

P – pressão do gás

V – volume do gás

n – quantidade de gás em moles

R – constante dos gases perfeitos

T – temperatura do gás

Para uma temperatura constante é então válida a seguinte equação para uma dada quantidade de gás confinada:

$$PV = cte \qquad \textbf{Eq. 20}$$

pelo que, o comportamento do gás pode ser esquematicamente representado pela Figura 58.

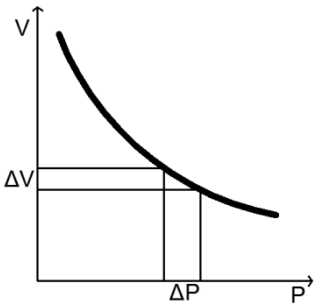


Figura 58 - Modelo de comportamento de um gás perfeito.

Ao se carregar um vidro duplo como o da Figura 59 a função da caixa-de-ar pode-se assemelhar a um sistema de molas de rigidez k. Se o ar for muito compressível a redução de volume *ΔV* é significativa e a rigidez das molas é próxima de zero e assim sendo, apenas o pano directamente carregado está a resistir ao carregamento. Por outro lado, se o gás for incompressível (ΔP=0 => ΔV=0), as molas têm rigidez infinita e a carga é distribuída proporcionalmente à rigidez de flexão dos panos, ou seja, ao cubo da espessura.

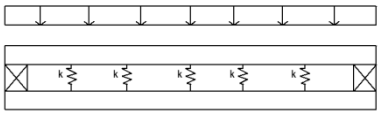


Figura 59 - Modelo de comportamento de um vidro duplo.

Esta secção procura, atendendo aos resultados obtidos para os afastamentos máximos entre *glass fins* (solução A, B e C), demonstrar como dimensionar este tipo de estrutura seguindo as indicações existentes na regulamentação internacional e comparar os resultados obtidos de acordo com os diferentes métodos. O modelo de cálculo é simplesmente apoiado em dois bordos (Figura 60), em que a largura do bordo apoiado, L_2, é 1200 mm (dimensão standard proveniente de fábrica) e é igual em todas as soluções estudadas. A secção transversal tipo é composta por uma caixa-de-ar de 16 mm e dois panos, em que um é monolítico (t_1) e o outro é laminado ($t_2 + t_3$) de acordo com a Figura 61. Os painéis são apoiados nas glass fins como mostra a Figura 62.

Recapitulando os resultados obtidos na secção anterior tem-se:

- Solução A – $L_1 = 2500\ mm$
- Solução B – $L_1 = 3000\ mm$
- Solução C – $L_1 = 3500\ mm$

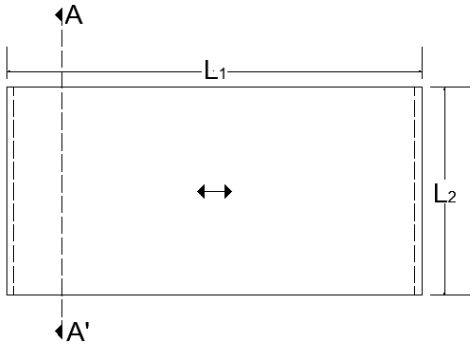


Figura 60 - Modelo estrutural do painel de fachada.

Figura 61 - Corte AA' do painel de fachada. Secção transversal.

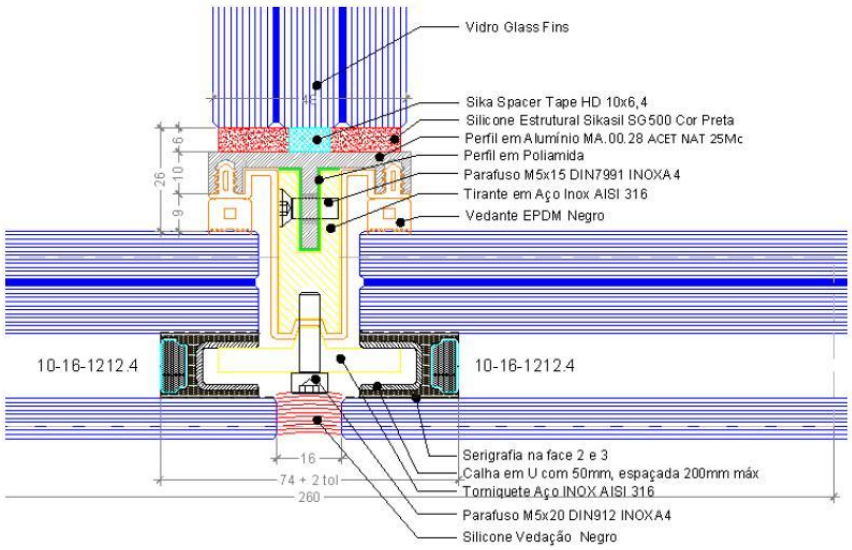


Figura 62 - Pormenor do tipo da ligação do painel à *glass fin* (28).

4.2.2 – Dimensionamento com base na ASTM E 1300-09a

Para o cálculo estrutural de um vidro laminado, a norma americana baseia-se no conceito de espessura efectiva, cada vez mais utilizado pela generalidade dos projectistas e igualmente presente na prEN13474[9]. Conceito esse que se baseia na análise de estruturas *sandwiche*, inicialmente desenvolvido por *Wolfel* (1987) e que fornece métodos analíticos para o calculo da espessura facilitando a construção de modelos de elementos finitos.

$$h_{ef,w} = \sqrt[3]{h_1^3 + h_2^3 + 12.\Gamma.I_s} \qquad \textbf{Eq. 21}$$

[9] Pré-norma europeia para o uso do vidro estrutural.

$$h_{1;ef;\sigma} = \sqrt[2]{\frac{h_{ef;w}^3}{h_1 + 2.\Gamma.h_{s;2}}}$$ **Eq. 22**

$$h_{2;ef;\sigma} = \sqrt[2]{\frac{h_{ef;w}^3}{h_2 + 2.\Gamma.h_{s;1}}}$$ **Eq. 23**

$$h_{s;1} = \frac{h_s h_1}{h_1 + h_2}$$ **Eq. 24**

$$h_{s;2} = \frac{h_s h_2}{h_1 + h_2}$$ **Eq. 25**

$$h_s = 0{,}5 * (h_1 + h_2) + h_v$$ **Eq. 26**

$$\Gamma = \frac{1}{1 + 9{,}6 * \frac{EI_s h_v}{G h_s^2 a^2}}$$ **Eq. 27**

$$I_s = h_1 h_{s;2}^2 + h_2 h_{s;1}^2$$ **Eq. 28**

onde,

$h_{ef,w}$ – Espessura efectiva para o cálculo da deformação;

$h_{i;ef;\sigma}$ - Espessura efectiva para o cálculo da tensão máxima de flexão no vidro *i;*

Γ - Coeficiente de transferência de corte (se igual 0 significa que os panos trabalham separadamente, se igual a 1 significa comportamento monolítico);

E – Módulo de elasticidade do vidro;

G – Módulo de resistência ao corte da película intermédia.

Este método contempla a influência do módulo de resistência ao corte das películas intermédias que por sua vez é determinado em função da temperatura e da duração do carregamento.

De forma simplificada, considera-se para o caso dos vidros duplos que não existe variação de volume da caixa-de-ar e por conseguinte, a deformação do pano interior será aproximadamente igual à deformação do pano exterior, pelo que se reparte a carga proporcionalmente à rigidez de cada pano:

$$P_i = \frac{h_i^3}{\sum_i h_i^3} * P$$ **Eq. 29**

Conservativamente podem-se considerar como valores máximos para a tensão admissível o exposto na Tabela 14.

Tabela 14 - Tensões admissíveis para cargas de curta duração (3seg). ASTM E 1300-09a [MPa].

	Recozido	Termoendurecido	Temperado
longe dos bordos	23,3	46,6	93,1
bordo cortado	16,6	n/a	n/a
bordo com ligeiro acabamento[10]	18,3	36,5	73
bordo polido	20	36,5	73

Na análise dos painéis das soluções A, B e C, considerou-se o módulo de resistência ao corte da película de PVB igual 0,4 MPa (corresponde a uma carga de 3seg e um temperatura de 50°C). e um coeficiente de Poisson[11] de 0,5. As tabelas Tabela 15 a Tabela 17, resumem os resultados obtidos analiticamente.

Tabela 15 - Resultados para o paínel A.

ANÁLISE DO PAINEL 2,5X1,2 – Solução A[12]							
t_1[mm]	t_2[mm]	t_3 [mm]	$h_{ef,\sigma}$[mm]	W_m [KPa]	W_l [KPa]	σ_m[MPa]	σ_l [MPa]
6	8	8	13,3	0,126	1,374	13,7	30,3
8	10	10	16,1	0,164	1,336	10,0	20,1
10	12	12	19,0	0,191	1,309	7,5	14,2
12	15	15	23,2	0,182	1,318	4,9	9,6
15	19	19	28,8	0,186	1,314	3,2	6,2

Tabela 16 - Resultados para o paínel B.

ANÁLISE DO PAINEL 3,0X1,2 – Solução B							
t_1[mm]	t_2[mm]	t_3 [mm]	$h_{ef,\sigma}$[mm]	W_m [KPa]	W_l [KPa]	σ_m[MPa]	σ_l [MPa]
6	8	8	13,3	0,126	1,374	19,7	43,7
8	10	10	16,1	0,164	1,336	14,4	29,0
10	12	12	19,0	0,191	1,309	10,7	20,4
12	15	15	23,2	0,182	1,318	7,1	13,8
15	19	19	28,8	0,186	1,314	4,6	8,9

[10] Denominado como “seamed edge”.
[11] Osterrieder *et al* (22)
[12] O indice ‘m’ corresponde ao vidro monolítico, enquanto o índice ‘l’ corresponde ao vidro laminado.

Tabela 17 - Resultados para o paínel C.

ANÁLISE DO PAINEL 3,5X1,2 – Solução C							
t_1[mm]	t_2[mm]	t_3 [mm]	$h_{ef,\sigma}$[mm]	W_m [KPa]	W_l [KPa]	σ_m[MPa]	σ_l [MPa]
6	8	8	13,3	0,126	1,374	26,8	59,5
8	10	10	16,1	0,164	1,336	19,6	39,5
10	12	12	19,0	0,191	1,309	14,6	27,8
12	15	15	23,2	0,182	1,318	9,7	18,7
15	19	19	28,8	0,186	1,314	6,3	12,1

Não sendo usual escolher soluções exclusivamente compostas por vidro temperado (capítulo 2), as tensões são controladas ou pelo vidro termoendurecido ou pelo vidro recozido, consoante o tipo de vidro seleccionado. Para o caso em que um dos laminados é recozido e com bordos polidos, tem-se:

- Solução A : $h_2 = \ h_3 = 12\ mm\ e\ h_1 = 10\ mm$
- Solução B : $h_2 = \ h_3 = 15\ mm\ e\ h_1 = 12\ mm$
- Solução C : $h_2 = \ h_3 = 15\ mm\ e\ h_1 = 12\ mm$

Caso um dos laminados seja termoendurecido, tem-se:

- Solução A' : $h_2 = \ h_3 = 8\ mm\ e\ h_1 = 6\ mm$
- Solução B' : $h_2 = \ h_3 = 10\ mm\ e\ h_1 = 8\ mm$
- Solução C' : $h_2 = \ h_3 = 12\ mm\ e\ h_1 = 10\ mm$

Deformações

Como descrito anteriormente, o método prevê uma forma de cálculo diferente para a espessura efectiva no cálculo de deformações, assim sendo, tem-se:

- Solução A

$$h_{ef,w} = \sqrt[3]{t_2^3 + t_3^3 + 12.\Gamma.I_s} = \ 16{,}9\ mm$$

Repartindo proporcionalmente a carga pelo cubo da espessura de cada pano obtém-se para um painel simplesmente apoiado,

$$\delta_{1/2}^{A} = \frac{5 * p * l^4}{384 * E * I} = 18{,}4\ mm\ \approx L/136$$

- Solução B

Do mesmo modo obtém-se:

$$h_{ef,w} = 20{,}7\ mm$$

$$=> \ \delta_{1/2}^{B} = 21{,}0\ mm \ \approx L/143$$

- Solução C

$$h_{ef,w} = \ 20{,}7\ mm$$

$$=> \ \delta_{1/2}^{C} = 39{,}0\ mm \ \approx L/90$$

- Solução A'

$$h_{ef,w} = 11{,}8\ mm$$

$$=> \ \delta_{1/2}^{C} = 57{,}8\ mm \approx L/43$$

- Solução B'

$$h_{ef,w} = 14{,}4\ mm$$

$$=> \ \delta_{1/2}^{C} = 63{,}7\ mm \ \approx L/47$$

- Solução C'

$$h_{ef,w} = 16{,}9\ mm$$

$$=> \ \delta_{1/2}^{C} = 70{,}8\ mm \ \approx L/49$$

A norma especifica somente um limite de deformação para a estrutura de suporte (L/175), não sendo esclarecedora quanto à limitação máxima do painel.

4.2.3 – Dimensionamento com base na NF DTU 39

A espessura total do envidraçado deverá ser para o caso de um vidro duplo, onde um dos panos é monolítico e o outro é laminado,

$$e_t = \frac{h_2 + h_3}{\varepsilon_2} + h_1 \geq e_1 * \varepsilon_1 \qquad \textbf{Eq. 30}$$

e, para vidros apoiados em dois bordos,

$$e_1 = \frac{L * \sqrt{W}}{4{,}9} \qquad \textbf{Eq. 31}$$

sendo que,

L – Comprimento do vão em metros;

W – Pressão de cálculo em Pa;

ε_1 – Factor de equivalência para vidros isolantes (1,5 para vidros duplos e 1,7 para vidros triplos);

ε_2 - Factor de equivalência para vidros laminados (1.3 para vidros laminados de duas lâminas).

Adicionalmente, a norma obriga a controlar a deformação do vidro. Para a verificação da flecha, é necessário determinar uma espessura equivalente, e_2

$$e_2 = \frac{\frac{h_2 + h_3}{\varepsilon_2} + h_1}{\varepsilon_1} \quad \textbf{Eq. 32}$$

e,

$$f = \alpha . \frac{P}{1{,}2} . \frac{c^4}{e_2^3} \quad \textbf{Eq. 33}$$

onde,

α – Coeficiente que depende das condições de apoio e da relação de vãos (para o caso simplesmente apoiado em dois vãos, o valor a adoptar é sempre 2,1143);

c – Comprimento do bordo livre.

Para vidros duplos a deformação máxima deve respeitar a seguinte condição:

$$f \leq \frac{L}{150} ou\ 6{,}67xc \quad \textbf{Eq. 34}$$

Solução A

- L=2,5 m e W=1500 Pa

$$e_1 = \frac{L * \sqrt{W}}{4{,}9} = \frac{2{,}5\sqrt{1500}}{4{,}9} = 19{,}76\ mm$$

$$e_t = \frac{h_2 + h_3}{\varepsilon_2} + h_1 \geq e_1 * \varepsilon_1 = 19{,}76 * 1{,}5 = 29{,}64\ mm$$

Admitindo que o vidro monolítico tem uma espessura[13] de 10 mm, e que os laminados têm a mesma espessura:

$$e_t = \frac{2 * (h_2 - 0{,}2)}{1{,}3} + (10 - 0{,}2) \geq 29{,}64\ mm$$

[13] A norma aconselha a que o cálculo tenha em conta um eventual desvio da espessura real em relação à espessura nominal, considerando-se assim um desvio de 0,2 mm para cada vidro.

$$=> \ h_2 \geq 13{,}10 \ mm$$

Não sendo aconselhável ter diferenças acentuadas de espessura entre panos que compõem um vidro duplo e tendo em conta as soluções disponíveis em (13) a solução a adoptar será:

- $h_2 = \ h_3 = 15 \ mm \ e \ h_1 = 12 \ mm$

Verificação da deformação

$$e_2 = \frac{\frac{h_2 + h_3}{\varepsilon_2} + h_1}{\varepsilon_1} = \frac{\frac{14{,}8 + 14{,}8}{1{,}3} + 11{,}8}{1{,}5} = 23{,}1 \ mm$$

$$f = 2{,}1143 * \frac{1500}{1{,}2} * \frac{2{,}5^4}{23{,}1^3} = 8{,}43 \ mm < 16{,}7 \ mm \ (L/150)$$

Solução B

- L=3,0 m e W=1500 Pa

$$e_1 = \frac{L * \sqrt{W}}{4{,}9} = \frac{3{,}0\sqrt{1500}}{4{,}9} = 23{,}7 \ mm$$

$$e_t = \frac{h_2 + h_3}{\varepsilon_2} + h_1 \geq e_1 * \varepsilon_1 = 23{,}7 * 1{,}5 = 35{,}6 \ mm$$

Admitindo que o vidro monolítico tem uma espessura de 12 mm, e que os panos que compõem o vidro laminado têm a mesma espessura,

$$e_t = \frac{2 * (h_2 - 0{,}2)}{1{,}3} + (12 - 0{,}2) \geq 35{,}6 \ mm$$

$$=> \ h_2 \geq 15{,}7 \ mm$$

As espessuras devem ser igualmente ajustadas, tendo-se:

- $h_2 = \ h_3 = 19 \ mm \ e \ h_1 = 15 \ mm$

Verificação da deformação

$$e_2 = \frac{\frac{h_2 + h_3}{\varepsilon_2} + h_1}{\varepsilon_1} = \frac{\frac{18{,}8 + 18{,}8}{1{,}3} + 14{,}8}{1{,}5} = 29{,}2 \ mm$$

$$f = 2{,}1143 * \frac{1500}{1{,}2} * \frac{3{,}0^4}{29{,}2^3} = 8{,}6 \ mm < 20{,}0 \ mm \ (L/150)$$

Solução C

- L=3,5 m e W=1500 Pa

$$e_1 = \frac{L * \sqrt{P}}{4{,}9} = \frac{3{,}5\sqrt{1500}}{4{,}9} = 27{,}7\ mm$$

$$e_t = \frac{h_2 + h_3}{\varepsilon_2} + h_1 \geq e_1 * \varepsilon_1 = 27{,}7 * 1{,}5 = 41{,}5\ mm$$

Admitindo que o vidro monolítico tem uma espessura de 15 mm,

$$e_t = \frac{2 * (h_2 - 0{,}2)}{1{,}3} + (15 - 0{,}2) \geq 41{,}5\ mm$$

$$=>\ h_2 \geq 17{,}6\ mm$$

Assim,

- $h_2 = h_3 = 19\ mm\ e\ h_1 = 15\ mm$

Verificação da deformação

$$e_2 = \frac{\frac{h_2 + h_3}{\varepsilon_2} + h_1}{\varepsilon_1} = \frac{\frac{18{,}8 + 18{,}8}{1{,}3} + 14{,}8}{1{,}5} = 29{,}2\ mm$$

$$f = 2{,}1143 * \frac{1500}{1{,}2} * \frac{3{,}5^4}{29{,}2^3} = 16{,}0\ mm < 23{,}3\ mm\ (L/150)$$

4.2.4 – Discussão dos resultados

Obteve-se de acordo com a norma francesa soluções mais conservativas do que aquelas que foram obtidas pela norma americana.

Em termos conceptuais a norma americana parece ser mais vocacionada para a utilização do vidro como material estrutural, fornecendo meios para o cálculo da tensão actuante, tendo em consideração diversos factores de relativa importância sobretudo no desempenho do vidro laminado. O método preconizado na norma francesa não entra em linha de conta com o tipo de vidro utilizado, nem com o tipo de película, retirando assim aos projectistas a possibilidade de tirar melhor partido da capacidade resistente dos materiais.

Os resultados obtidos de acordo com a ASTM são comparados no anexo IV, com os resultados obtidos com recurso ao software MEPLA, destinado exclusivamente à análise de estruturas de vidro e que tem a possibilidade de analisar o comportamento global de vidros duplos e laminados, tendo em

conta o fluxo de corte transmitido pela película intermédia bem como a compressibilidade do ar introduzido na caixa-de-ar. Embora haja algumas diferenças nas tensões calculadas, os resultados conduziram ao mesmo resultado para todas as soluções, excepto para a solução C' (vidro termoendurecido). A Tabela 18 resume os resultados obtidos com o MEPLA, e mostram erros relativos das tensões máximas em ambos os panos para a solução A. Através do gráfico da Figura 63, também relativo à solução A, pode se constatar que os resultados para o vidro laminado tendem a convergir à medida que a espessura aumenta enquanto o gráfico da Figura 64 demonstra a situação inversa para o vidro monolítico. Os restantes resultados encontram-se igualmente no anexo IV.

O erro relativo foi determinado de acordo com a equação seguinte:

$$\xi = \frac{|\sigma_{SAP} - \sigma_{MEPLA}|}{\sigma_{MEPLA}} \qquad \textbf{Eq. 35}$$

Tabela 18 - Comparação com os resultados obtidos pelo MEPLA para a solução A.

ANÁLISE DO PAINEL 2,5X1,2						
h_1[mm]	h_2[mm]	h_3[mm]	σ_m[MPa]	σ_L[MPa]	ξ_{σ_m}	ξ_{σ_L}
6	8	8	14	27,2	2,2%	11,5%
8	10	10	10,5	18,2	4,7%	10,6%
10	12	12	8,2	13	9,1%	9,0%
12	15	15	5,6	8,9	11,7%	7,4%
15	19	19	3,8	5,9	15,2%	4,9%

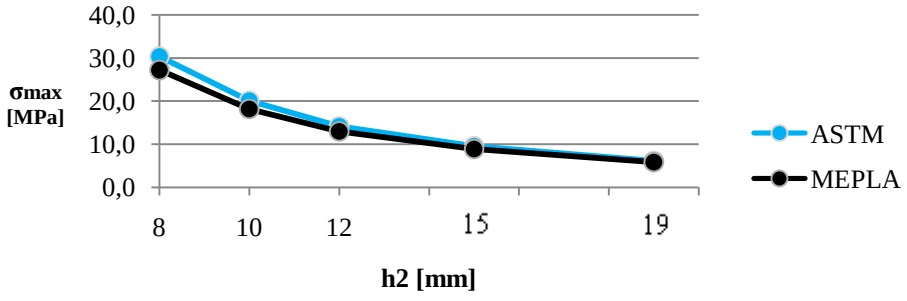


Figura 63 - Gráfico tensão máxima no vidro laminado/espessura do vidro laminado

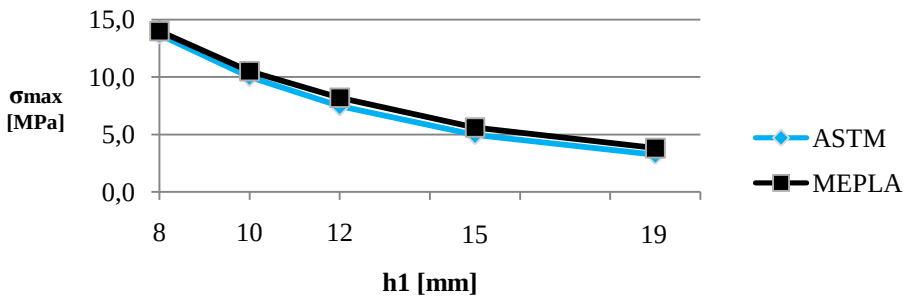


Figura 64 - Gráfico da tensão máxima no vidro tmonolítico/espessura do vidro.

4.3 – Pavimento

4.3.1 – Nota introdutória

A popularidade dos pavimentos em vidro tem crescido nos últimos anos um pouco por todo o mundo, assim é que, existem já algumas normas disponíveis relativamente ao dimensionamento de pavimentos. Contudo, a diversidade de informação existente torna muito complicada a tarefa dos projectistas.

O dimensionamento de estruturas em vidro dispostas na horizontal requer cuidados redobrados face aos elevados danos, nomeadamente humanos, que podem ocorrer em caso de rotura e também devido à presença de cargas de carácter permanente, que diminuem quer a capacidade de carga do vidro quer a rigidez das películas intermédias.

Neste capítulo, é abordado o “Caso de Estudo 2” , correspondente ao pavimento da Figura 65 (corte transversal Figura 66), onde se determina para as mais diversas conjugações de vãos possíveis, a espessura necessária de acordo com as normas e recomendações existentes. O cálculo é feito com recurso a modelos de elementos finitos, cumprindo a regulamentação americana - ASTM E 2751 – 11 “Standard Practice for Design and Performance of Supported Glass Walkways”.

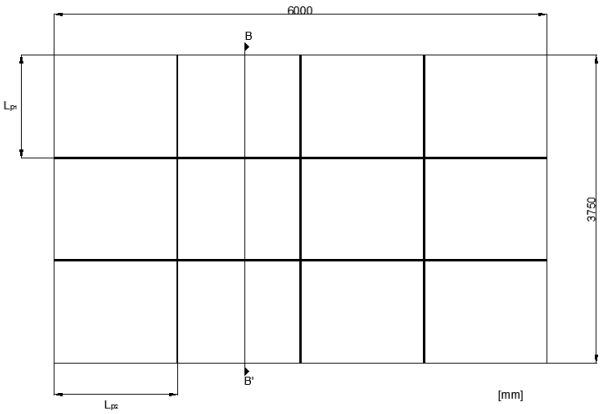


Figura 65 - Caso de Estudo 2 - Planta do pavimento.

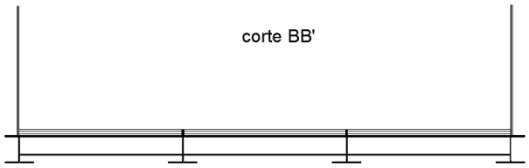


Figura 66 - Caso de Estudo 2 - Corte transversal BB'.

4.3.2 – Escolha de materiais

Na concepção de pavimentos é obrigatório o uso de vidro laminado dada a importância de diminuir a eventualidade de uma rotura frágil. A escolha do tipo de vidro representa ainda hoje em dia um tema de discórdia entre os especialistas. Alguns recomendam o uso exclusivo de vidro recozido invocando a dimensão do fragmento e o comportamento pós rotura (capitulo 2), para além da dificuldade tecnológica na laminagem dos vidros termoendurecidos, já que do processo de fabrico resulta uma superfície ligeiramente irregular e que pode dar origem a bolhas de ar quando colado com outro vidro do mesmo tipo. Uma das técnicas utilizadas para contrariar esta questão, embora não esteja prevista nas regulamentações abordadas no âmbito deste trabalho, recorre frequentemente à introdução de camadas intermédias mais espessas (4 camadas de PVB) reduzindo a probabilidade de existência de bolhas de ar nas interfaces. Adicionalmente confere ainda alguma capacidade de amortecimento na eventual queda de pessoas e objectos. Por outro lado, tem-se algumas das soluções mais mediáticas realizadas com recurso a vidros temperados termicamente (Figura 67 e Figura 68).

Figura 67 - *Grand Canyon Skywalk* (Estados Unidos) (9)

Figura 68 - Passadiço na Basílica de Aquileia (Itália) (38).

Perante esta incerteza, opta-se neste capítulo por considerar soluções compostas por vidro recozido e vidro termoendurecido.

Apesar da crescente utilização das películas de SGP em pavimentos, os exemplos mais comuns recorrem à utilização de películas de PVB e por isso, opta-se neste capítulo pela segunda solução.

Um correcto dimensionamento obriga neste caso a ter alguma redundância no sistema, isto é, em caso de quebra de algum dos laminados, a restante estrutura tem de permanecer em segurança até que se proceda à operação de reparação ou substituição. A SaintGobain (13) aconselha que deve ser acrescentado um vidro da mesma espessura e do mesmo tipo para garantir uma segurança reforçada. No pavimento da Figura 67, segundo Bennison (9), após garantida a segurança estrutural do pavimento, foi adicionado um vidro temperado amovível de 8 mm de espessura permitindo em caso de rotura, a substituição do pano danificado, oferecendo assim segurança adicional e maior redundância ao sistema. Conservativamente, este pano não é considerado no cálculo estrutural.

Sendo o vidro um material com um coeficiente de atrito reduzido e por isso susceptível ao deslizamento (sobretudo na presença de humidade), o vidro colocado na face superior deverá ser dotado de um revestimento anti-derrapante ou então submetido a um tratamento próprio para o efeito. A norma americana estabelece que o coeficiente de atrito mínimo a utilizar nos pavimentos é de 0,5.

Os painéis são normalmente suportados por uma malha de vigas de aço, onde é imprescindível, novamente, evitar o contacto directo entre o vidro e o aço (*Teflon*® ou neoprene).

Por último e apesar de não estar previsto nas normas referidas, é oportuno referir a necessidade de introduzir uma barra em aço inoxidável ao longo das juntas transversais e longitudinais do pavimento Figura 69. O atrito originado pelo caminhar das pessoas gera corrente eléctrica, carregando negativamente as próprias pessoas, tornando-se então necessário descarregar essa corrente de uma forma gradual, de modo a não colocar em risco a segurança dos utilizadores. A introdução da barra em aço inox é até hoje a solução encontrada para resolver esta questão, que está longe de ser do conhecimento geral da comunidade de projectistas. As juntas são posteriormente preenchidas com silicone, não devendo ter uma largura superior a 4 mm, sob o risco de puderem ser danificadas pelos saltos dos sapatos utilizados por senhoras e com a consequente deteorização não só da junta mas

também das películas de PVB, que com a penetração de produtos de lavagem podem perder integridade.

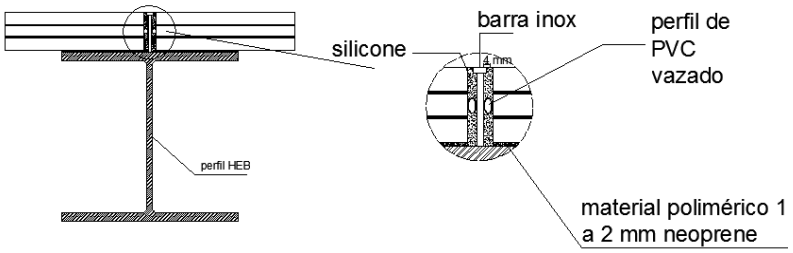


Figura 69 - Pormenor da descarga eléctrica para um pavimento de vidro.

4.3.3 - Dimensionamento do pavimento

A Tabela 19, resume as tensões máximas admissíveis estipuladas no documento. As acções a considerar são:

- Peso próprio
- Sobrecarga uniformemente distribuída[14], $q_k = 7000\ N/m^2$
- Sobrecarga concentrada, $Q_k = 1340\ N$

Tabela 19 - Tensão máxima admissível em pavimentos, ASTM E 2751-11.

Tipo de vidro	σ_{adm} $[MPa]$ (carga permanente)
Recozido	5,7
Termoendurecido	20,3
Temperado	49,4

Uma vez que a norma não faz qualquer referência ao tipo de vidro a utilizar, essa tarefa cabe então ao projectista. O método apresentado para o cálculo de vidros laminados na secção 4.4.3, diz respeito a vidros laminados de duas lâminas, não estando prevista para três ou mais. Assim e conservativamente, considera-se que o coeficiente de transmissão de corte, Γ, é nulo e adaptando as equações Eq. 21 e Eq. 22, tem-se:

$$h_{ef,w} = \sqrt[3]{h_1^3 + h_2^3 + h_3^3} \qquad \textbf{Eq. 36}$$

$$h_{1;ef;\sigma} = \sqrt[2]{\frac{h_{ef;w}^3}{h_1}} \qquad \textbf{Eq. 37}$$

[14] A norma não estipula qualquer referência ao valor da carga distribuída a considerar, pelo que o valor adoptado é semelhante ao utilizado em (9)

Com base nas equações anteriores é possível determinar a deformação do vidro bem como a tensão actuante, cujos resultados (obtidos através do software SAP2000) se apresentam na Tabela 20 e Tabela 21 para as diversas tipologias.

Tabela 20 - Resultados SAP/ASTM , $L_{p2} = 750\ mm$.

$L_{p2} = 750\ mm$						
Tipologia / L_{p1} (mm)	**1500**		**2000**		**2500**	
	σ_{max}[MPa]	δ[mm]	σ_{max}[MPa]	δ[mm]	σ_{max}[MPa]	δ[mm]
3x8	16,1	2,6	16,4	3	16,5	3,2
3x10	10,4	1,4	10,6	1,6	10,7	1,7
3x12	7,3	0,79	7,5	0,9	7,9	1
3x15	4,8	0,4	4,7	0,5	5	0,5

Tabela 21 - Resultados SAP/ASTM, $L_{p2} = 1250\ mm$.

$L_{p2} = 1250\ mm$						
Tipologia / L_{p1} (mm)	**1500**		**2000**		**2500**	
	σ_{max}[MPa]	δ[mm]	σ_{max}[MPa]	δ[mm]	σ_{max}[MPa]	δ[mm]
3x8	22,6	11,2	31,6	16,5	37,6	20,1
3x10	14,6	5,8	20,5	8,5	24,4	10,4
3x12	10,3	3,4	14,5	5	17,2	6,1
3x15	6,8	1,8	9,5	2,7	11,3	3,2

As tensões admissíveis são para o vidro termoendurecido e para o vidro recozido 20,3 MPa e 5,7 MPa respectivamente, pelo que se obtém as soluções apresentadas na Tabela 22. Para a tipologia onde a extensão do vão menor é de 1250 mm, não é possível utilizar soluções de três vidros laminados (para as espessuras estudadas, 8; 10; 12 e 15 mm), pelo que caso se opte por esta solução deve-se testar a possibilidade de quatro vidros laminados.

Tabela 22 - Soluções para o pavimentos, vidro termoendurecido e recozido.

	Termoendurecido			**Recozido**		
L_{p2}/L_{p1} [mm]	**1500**	**2000**	**2500**	**1500**	**2000**	**2500**
750	3x8	3x8	3x8	3x15	3x15	3x15
1250	3x10	3x12	3x12	n.a	n.a	n.a

4.3.4 – Discussão de resultados

Também no caso dos pavimentos foi útil recorrer à utilização do software MEPLA, visto ter sido possível constatar a validade do método preconizado pela ASTM relativamente à análise estrutural de vidros laminados. Os resultados obtidos pelo MEPLA resumem-se nas Tabela 23 e Tabela 24. A

Figura 70 mostra a evolução da tensão máxima em função da espessura do pavimento com os dois *softwares*, o erro relativo da tensão máxima diminui com o aumento da espessura da solução. Na Tabela 25 pode-se consultar os valores dos erros relativos entre o SAP e o MEPLA para o caso em que o vão menor vale 750 mm, sendo o erro máximo relativo de todas as soluções estudadas de 7% para a tensão máxima e de 1% para a deformação máxima (anexo V).

Tabela 23 - Resultados MEPLA, $L_{p2} = 750\ mm$.

$L_{p2} = 750\ mm$						
Tipologia / L_{p1} (mm)	**1500**		**2000**		**2500**	
	σ_{max}[MPa]	**δ[mm]**	**σ_{max}[MPa]**	**δ[mm]**	**σ_{max}[MPa]**	**δ[mm]**
3x8	15,1	2,6	15,4	3	16,1	3,2
3x10	9,8	1,4	10	1,6	10,6	1,7
3x12	6,9	0,8	7,1	0,9	7,5	1
3x15	4,6	0,4	4,7	0,5	4,9	0,5

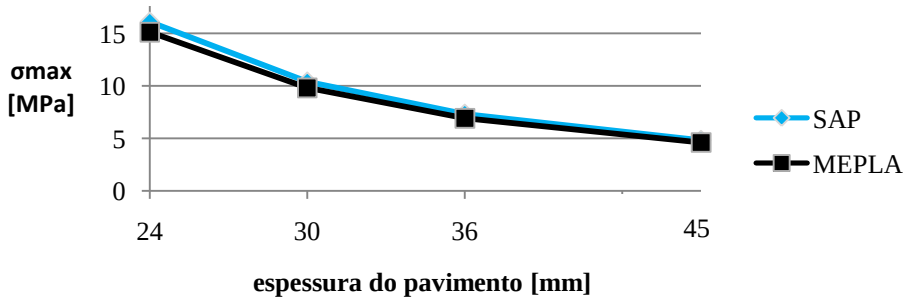
Tabela 24 - Resultados MEPLA, $L_{p2} = 1250\ mm$.

$L_{p2} = 1250$						
Tipologia / L_{p1} (mm)	**1500**		**2000**		**2500**	
	σ_{max}[MPa]	**δ[mm]**	**σ_{max}[MPa]**	**δ[mm]**	**σ_{max}[MPa]**	**δ[mm]**
3x8	22,3	11,1	31,2	16,2	37,1	19,7
3x10	14,6	5,8	20,4	8,5	24,3	10,3
3x12	10,4	3,4	14,5	5	17,2	6,12
3x15	6,9	1,8	9,6	2,7	11,4	3,2

Tabela 25 - Tabela de erros relativos entre SAP e MEPLA, para $L_{p2} = 750\ mm$.

$L_{p2} = 750\ mm$						
Tipologia / L_{p1} (mm)	**1500**		**2000**		**2500**	
	ξ_σ	**ξ_δ**	**ξ_σ**	**ξ_δ**	**ξ_σ**	**ξ_δ**
3x8	7%	0%	6%	0%	2%	0%
3x10	6%	0%	6%	0%	1%	0%
3x12	6%	1%	6%	0%	5%	0%
3x15	4%	0%	0%	0%	2%	0%

Figura 70 - Gráfico tensão máxima/espessura do pavimento, $L_{p1} = 750\ mm$ e $L_{p2} = 1500\ mm$.



4.4 – Guarda-corpos

4.4.1 – Nota introdutória

O vidro estrutural tem ganho espaço também na execução de guarda corpos, quer no exterior como no interior, permitindo combinar soluções preferíveis do ponto de vista estético e seguras, com recurso a vidro laminado de segurança (Figura 71).

Figura 71 - Guarda-corpos em vidro (52).

Na Figura 72 está ilustrado um caso real de um guarda corpos situado numa varanda, consistindo num balanço em consola fixado à laje de betão, composto por uma estrutura metálica em chapa quinada e soldada, a qual recebe a guarda de vidro.

Os diâmetros dos furos nos vidros são 40 mm por razões de controlo de tensões máximas nos bordos da furação. O contacto da estrutura metálica com o vidro é evitado com recurso a placas e enchimentos com material polimérico (Teflon, neoprene, silicone, etc).

Utilizam-se aqui como normas para a verificação dos painéis de vidro, a DTU-39 P4 e recomendações da SGG para as tensões máximas admissíveis. A verificação da estrutura metálica é adequada à norma EN 1993 Eurocódigo 3 – Estruturas Metálicas.

As acções a considerar são:

- Peso próprio dos materiais;
- Sobrecarga de serviço uniformemente distribuída no bordo superior da guarda de 1 kN/m;
- Vento (1,2 kN/m²).

As combinações de acções a considerar, são:

Estado Limite Último - Acção base – vento/sobrecarga horizontal – Análise de tensões no aço das chapas e dos parafusos

$$S_d = 1.35 \times S_{G,k} + 1.5 \times \left(S_{q,K} ou S_{W,k} \right) \qquad \textbf{Eq. 38}$$

Estado Limite Utilização (Combinação Rara) – Acção base – vento/sobrecarga horizontal – Análise de tensões e deformações máximas no painel vidro.

$$S_{Raro} = S_{G,k} + \left(S_{q,K} ou S_{W,k}\right)$$ **Eq. 39**

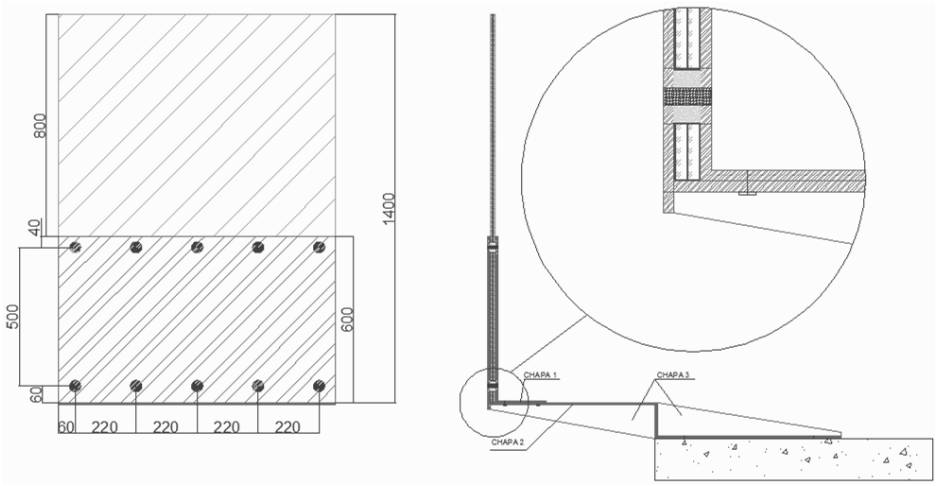


Figura 72 - Caso de Estudo 3 - Guarda-corpos.

4.4.2 – Escolha de materiais

O vidro é laminado com duas chapas de 10 mm cada, coladas entre si com 2 PVB. Por razões de segurança uma das chapas é em vidro temperado e a outra é em vidro termoendurecido. O vidro laminado é fixado na chapa do balanço contra uma dobra vertical da chapa e confinado com uma contra-chapa dobrada em L, sendo o conjunto fixado entre si com parafusos M12.. A contra-chapa em L é fixada na base do L à chapa principal com 8 parafusos M12. A chapa principal é fixada à laje de betão com 8 pernos roscados e contra-chapa.

A chapa de 8 mm de espessura é em aço S355JR e os parafusos/pernos roscados são em aço 5.6 e têm 12 mm de diâmetro. O vidro está isolado das bolachas metálicas/parafusos alternativos com anilhas em material polímerico com cerca de 1 mm de espessura.

4.4.3 – Dimensionamento da guarda

Com recurso a um modelo de elementos finitos (vidro e chapas com elementos de casca fina; parafusos modelados com peças lineares), procedeu-se à verificação de tensões e esforços de todos os elementos.

Considera-se que a carga é distribuída proporcionalmente à rigidez dos laminados, pelo que simplificadamente, na análise de tensões no vidro considerou-se apenas um vidro sujeito a metade da carga.

A tensão máxima admissível é condicionada pelo vidro termoendurecido que, de acordo com a NF DTU39 é de 35 MPa, verificando por isso a segurança Figura 73.

Para a carga de serviço (vento), a deformação máxima é de 21,8 mm e a deformada está representada na Figura 74.

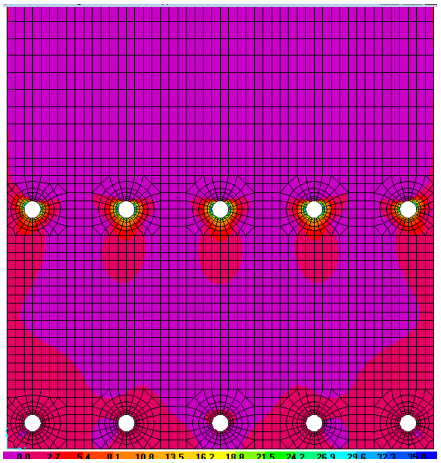


Figura 73 - Diagrama de tensão máxima no vidro ($\sigma_{max} = 31,9\ MPa$).

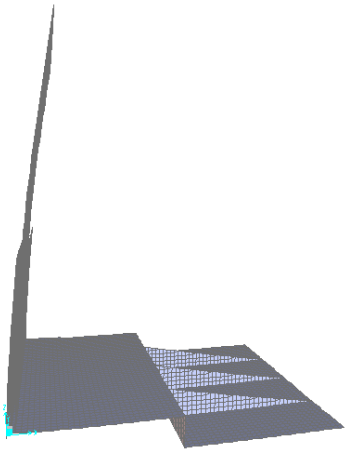


Figura 74 - Deformada.

A verificação de segurança da estrutura metálica é feita com base na tensão de comparação, sendo a tensão de cedência nas chapas e nos reforços é 355 MPa. Nas figuras seguintes, demonstra-se as tensões de comparação (inferior ao limite de cedência do aço) nos três tipos de chapas consideradas.

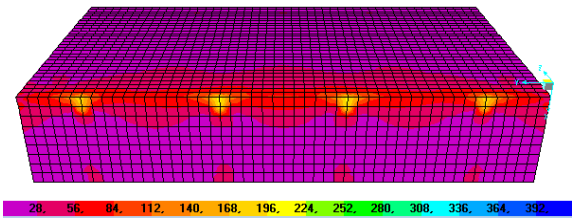


Figura 75 - Tensão de comparação na chapa em L ($\sigma_{comp} = 214\ MPa$).

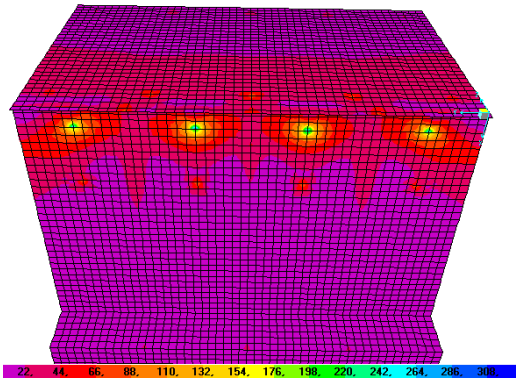


Figura 76 - Tensão de comparação na chapa principal ($\sigma_{comp} = 333\ MPa$).

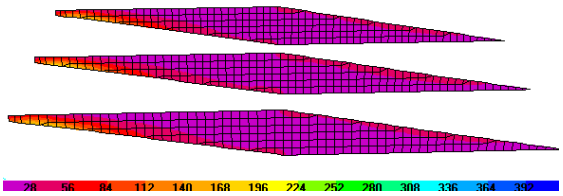


Figura 77 - Tensão de comparação nas chapas de reforço ($\sigma_{comp} = 175\ MPa$).

Verificação de segurança dos parafusos

Na ligação vidro-chapa, os esforços no parafuso mais solicitado são:

- N=0,21 kN
- V=9,10 kN

Assim como foi considerado na verificação de segurança das ligações do caso prático 1, considera-se o parafuso uma barra simplesmente apoiada nas chapas e uniformemente carregada pelo vidro, pelo que os esforços a meio vão são:

- N=200 N
- M=64 N.m

A tensão de comparação é então dada por:

$$\sigma_{comp} = \frac{M}{I} * r = \frac{M * r}{\pi * \frac{r^4}{4}} + \frac{N}{A} = 0{,}064 * \frac{0{,}006}{\pi * \frac{0{,}006^4}{4}} + \frac{0{,}2}{\pi * 0{,}006^4} = 377\ MPa\ < 500\ MPa$$

Na ligação da contra-chapa em L à chapa principal temos:

Caso 1

- N=10 kN
- V=5,2kN

Caso 2

- N=8,8 kN
- V=6,3 kN

Pela EN1993 tem-se:

Resistência à tracção do parafuso:

$$F_{t,rd} = \frac{k_2 . f_{ub} . A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0{,}9\ x\ 500000\ x\ 0{,}0000843}{1{,}25} = 30{,}3\ kN$$

Resistência ao corte do parafuso:

$$F_{v,rd} = \frac{0{,}6\ x\ 500000\ x\ 0{,}0000843}{1{,}25} = 20{,}2\ kN$$

Interacção corte/tracção:

Caso 1

$$F_{s,Rd,ser} = \frac{k_s\, n\, \mu\, (F_{p.c} - 0{,}8F_{t,Ed,ser})}{\gamma_{M3}} = \frac{1\ x\ 2\ x\ 0{,}2\ x\ (0{,}7\ x\ 500000\ x\ 0{,}0000843 - 0{,}8\ x\ 10)}{1{,}1} = 7{,}8\ kN$$
$$> 5{,}2\ kN$$

Caso 2

$$F_{s,Rd,ser} = \frac{k_s\, n\, \mu\, (F_{p.c} - 0{,}8F_{t,Ed,ser})}{\gamma_{M3}} = \frac{1\ x\ 2\ x\ 0{,}2\ x\ (0{,}7\ x\ 500000\ x\ 0{,}0000843 - 0{,}8\ x\ 8{,}8)}{1{,}1} = 8{,}2\ kN$$
$$> 6{,}3\ kN$$

Os parafusos que compõem a ligação da chapa principal à laje de betão estão sujeitos a esforços inferiores aos referidos na ligação da chapa principal à contra-chapa em L, verificando-se assim a segurança dos mesmos.

5 – Conclusões e perspectivas de desenvolvimentos futuros

5.1 – Conclusões

O principal objectivo desta dissertação foi ajudar a compreender todo o processo que engloba a análise e o dimensionamento de estruturas de vidro, passando pela pesquisa das diversas normas internacionais, onde se procurou conhecer a grande variedade e complexidade das variáveis que têm de ser consideradas no vidro estrutural. Naturalmente que existem alguns assuntos de relativa importância que foram abordados superficialmente, uns por não serem exactamente o objectivo do trabalho, outros que pela sua elevada complexidade representam por si só motivo de investigação para outras dissertações.

O motivo deste trabalho surgiu de duas constatações, a primeira que resulta da crescente procura do vidro para fins arquitectónicos com consequente utilização estrutural, fachadas com *glass fins*, coberturas, pavimentos, guarda-corpos entre outros. A segunda pela grande lacuna existente nas normas nacionais, que muito tem limitado o crescimento desta área, onde se salvam raras excepções. O uso estrutural do vidro é muito recente quando comparado com outros materiais e talvez por isso não tenha havido ainda um período de maturação suficiente. Prova disso são as reservas existentes por parte da comunidade científica internacional relativamente à pré norma europeia (prEN13474) destinada ao uso de vidro estrutural. Assim, foi necessário recorrer às principais normas internacionais para resolver os casos de estudo abordados neste trabalho.

Para uma melhor compreensão dos conceitos que estão por detrás do dimensionamento do vidro estrutural, começou-se por dar a conhecer as principais características do vidro como material de construção, as suas vantagens e limitações. A capacidade resistente do vidro, nomeadamente a tensão de tracção última, é um dos principais pontos de discórdia a nível internacional e por outro lado, a razão da discórdia parece ser unânime e está relacionada com as imperfeições existentes no vidro, principalmente à superfície, que têm origem no processo de fabrico e que tornam a capacidade resistente do vidro numa grandeza de grande variabilidade estatística. O indiscutível desenvolvimento tecnológico da indústria vidreira tem permitido elevar os padrões de qualidade e de fiabilidade de uma forma generalizada um pouco por todo o Mundo e a utilização do vidro estrutural não seria possível sem esta evolução. Parte dessa evolução é devido aos tratamentos térmicos utilizados na melhoria da tensão resistente do vidro e sobretudo à utilização do vidro laminado que permitiu reduzir o risco de rotura frágil que tipicamente acontece no vidro simples.

Explicados alguns conceitos básicos relativos às características do material, seguiu-se a descrição das principais problemáticas, e os seus efeitos, que devem ser tidas em conta para um correcto dimensionamento. Foram abordados temas como a térmica e a acústica de edifícios, a segurança, os efeitos diferidos e os tipos de ligações usualmente utilizadas no vidro. A questão das ligações é de extrema importância dada a natureza do material e por isso foi referido várias vezes ao longo deste trabalho a sua relação com o problema da incapacidade de redistribuição de tensões do vidro, que

obriga a que as ligações sejam estudadas de forma detalhada, com recurso a modelos computacionais de elevada precisão. Dada a relevância das ligações em estruturas de vidro, foi estudado em pormenor a execução de uma emenda no âmbito do "Caso de Estudo 1".

Foi dado ao longo do trabalho, um especial ênfase à influência que os outros materiais utilizados nos sistemas de vidro têm no comportamento global, nomeadamente na tensão máxima actuante. A escolha dos materiais a utilizar deve ser feita de forma criteriosa e no caso das estruturas de vidro existem duas variáveis que assumem uma importância significativa: o tempo de actuação das cargas e a temperatura. A capacidade resistente do vidro é substancialmente inferior quando submetida a cargas de longa duração, mesmo que essa carga seja exclusivamente o seu peso próprio, como é o caso dos pavimentos, devido ao fenómeno de *stress corrosion* (5). As películas utilizadas para laminagem do vidro são caracterizadas pelo seu comportamento viscoelástico, demonstrando por isso relativa sensibilidade quer à duração do carregamento quer à temperatura a que se encontram. Foram estudadas ao longo deste trabalho dois tipos de películas na laminagem dos vidros, as de PVB e as *SentryGlasPlus*®. Foi possível constatar que, com base em alguns estudos (7) e (6), a utilização de vidro laminado com SGP permite optimizar a secção efectiva de um vidro laminado sujeito à flexão, já que consoante as condições de aplicação (temperatura e duração do carregamento) pode mesmo ser mais rígido que uma secção monolítica com a mesma quantidade de vidro.

A última parte do trabalho foi destinada à aplicação prática dos conceitos estudados em três situações correntes na utilização de vidro estrutural. Inicialmente foi estudado o caso concreto de uma fachada ("Caso de Estudo 1 "), onde o objectivo foi numa primeira fase dimensionar a estrutura de suporte (*glass fins*) e numa segunda fase os painéis de fachada em vidro duplo. No segundo caso foi estudado um pavimento em grelha composto por painéis rectangulares ("Caso de Estudo 2"), onde se determinou para várias combinações de vãos a espessura em função do tipo de vidro a utilizado. No terceiro e último caso, analisou-se um caso real de um guarda corpos, onde se procurou mediante um modelo de elementos finitos, verificar as tensões e deformações em todos os elementos que compõem a estrutura.

O dimensionamento da *glass fin* foi realizado com recurso a modelos de elementos finitos (*SAP2000 v14.2 advanced*) tendo-se concluído que a forma mais económica e segura de a construir, dado que a sua extensão (15 metros) não permitia a execução de um troço só, era realizar uma emenda a 4 metros do topo da viga, tendo-se optado pela introdução de quatro réguas metálicas aparafusadas duas a duas com um total de 16 parafusos M30. Foi também demonstrado numericamente que o material utilizado no preenchimento das folgas dos parafusos deve ser cuidadosamente escolhido, de forma a reduzir ao máximo a tensão de pico no vidro em torno do parafuso. Por último, foram analisadas três vigas com diferentes alturas da secção, 600 mm, 700 mm e 800 mm com o propósito de optimizar o afastamento máximo entre *glass fins*, tendo-se concluído que para um vento de 1,5 kPa, o afastamento máximo para as vigas de 600 mm e 700 mm são respectivamente 2,5m e 3m (respeitando o limites tensão impostos pela norma francesa NF DTU 39 e pela norma americana ASTM E 1300 para vidro termoendurecido). Para a viga de 800 mm de altura optou-se por um

afastamento máximo de 3,5m, embora este valor não esteja no limite da capacidade resistente da viga, porém, afastamentos superiores conduzem a deformações excessivas no painel de fachada.

Para o dimensionamento do painel de fachada foram abordados inicialmente dois métodos distintos, o primeiro previsto na ASTM E 1300 e o segundo previsto na NF DTU 39 P4. O último revelou-se consideravelmente mais conservativo que o primeiro, baseando-se num método de cálculo de espessuras empírico e com insuficiente justificação teórica, ao contrário do primeiro que é baseado no modelo de espessura efectiva e que entra em linha de conta com a resistência ao corte das películas intermédias utilizadas no vidro laminado. Com recurso ao software de elementos finitos *SJ MEPLA 3.5*, foi possível comparar os resultados obtidos com o método preconizado na ASTM, tendo-se chegado a valores relativamente próximos. A utilização deste software no cálculo de vidros duplos permite simular o comportamento global do painel, tendo em conta a presença do gás introduzido na caixa-de-ar e o comportamento do vidro laminado. Os resultados obtidos pelo MEPLA conduziram a espessuras idênticas às obtidas pela ASTM em todos os casos analisados, excepção feita para o painel C' (vão de 3500 mm com vidro termoendurecido) onde a ASTM conduziu a uma solução mais espessa.

No segundo caso foi seguida a norma ASTM E 2751-11 destinada exclusivamente para o dimensionamento de pavimentos de vidro. Foram testadas várias combinações de vãos para soluções compostas por três vidros laminados, tanto para vidro recozido como para vidro termoendurecido. Apesar de ser defendido por especialistas que a colagem de dois ou mais vidros termoendurecidos representa uma dificuldade do ponto de vista tecnológico, devido às superfícies irregulares que estes vidros apresentam inerentes ao processo de fabrico, não está prevista na norma qualquer limitação a esse respeito. Naturalmente que o vidro termoendurecido conduziu a soluções menos espessas dada a sua maior tensão resistente em relação ao vidro recozido. A norma ASTM E 1300, fornece um conjunto de fórmulas que conduzem ao cálculo da espessura equivalente a considerar na análise de vidros laminados (duas lâminas). Conservativamente utilizaram-se essas mesmas fórmulas para a análise do pavimento (três lâminas de vidro), onde se admitiu que o coeficiente de transferência de corte [Γ] era nulo. As espessuras calculadas foram utilizadas nos modelos de elementos finitos (SAP2000), onde foram considerados dois casos de carga distintos, respeitante a uma sobrecarga uniformemente distribuída e uma carga concentrada. De todas as hipóteses testadas, verificou-se que o vidro recozido não pode ser utilizado em todas elas ao contrário do termoendurecido, sendo possivelmente necessário recorrer a soluções com 4 vidros laminados. De entre os casos estudados neste trabalho, talvez o pavimento seja aquele que maior redundância exige face aos elevados riscos de danos em caso de rotura e por isso é recomendado a adição de uma lâmina de vidro temperado de 8 mm à face superior (13) e (9). Os resultados foram novamente comparados com o software MEPLA, tendo-se obtido resultados muito semelhantes com margens de erro reduzidas (7% para a tensão máxima e 2% para a deformação máxima).

Na análise do guarda corpos, conclui-se que o modelo projectado verifica a segurança de acordo com as normas internacionais, não existindo conclusões relevantes a retirar dado tratar-se de uma simples verificação de um caso existente. Acrescenta-se que a diminuição do diâmetro do furo ou do número

de furos, naturalmente conduz a tensões mais elevadas e seguramente viola os limites estabelecidos para a tensão máxima no vidro termoendurecido. Contudo, o modelo é significativamente conservativo na medida em que se considera que a transmissão de tensões do vidro para a chapa ocorre exclusivamente através dos parafusos, não contabilizando o efeito da transmissão de tensões que ocorre através do material polimérico que evita o contacto directo entre o vidro e a chapa.

Ao longo deste projecto as principais dificuldades encontradas estiveram associadas à recolha e à interpretação da regulamentação existente, que se encontra actualmente dispersa e por vezes com reduzida sustentação teórica, frequentemente destinada a casos concretos tornando difícil a transposição para casos mais gerais. Embora a comunidade científica tenha vindo a dar um forte contributo com algumas linhas gerais para o dimensionamento de estruturas de vidro (4), é necessária a criação de normas a nível europeu que reúnam o maior consenso possível de modo a que este sector consiga crescer de uma forma segura e económica.

5.2 – Perspectivas de desenvolvimentos futuros

É também devido a este panorama, que a margem de progressão é elevada e as possibilidades de investigação na área do vidro estrutural são actualmente inúmeras. Infelizmente, por falta de tempo e recursos, não foi possível complementar este projecto com uma parte experimental, onde se pudesse comprovar os resultados obtidos numericamente. Deixam-se algumas sugestões para eventuais projectos que possam surgir no seguimento deste:

1. Ao longo deste projecto abordaram-se questões relativas à influência dos diversos materiais utilizados nas estruturas de vidro, tendo-se modelado o efeito de alguns no comportamento global da estrutura. No seguimento destas análises, seria interessante comprovar os resultados que foram aqui obtidos mediante análises experimentais que avaliassem por exemplo a diferença de comportamento entre vigas coladas com PVB e vigas coladas com SGP ou até mesmo estudar os efeitos dos materiais usualmente escolhidos no preenchimento das folgas dos parafusos.
2. No caso prático do cálculo de fachadas com glass fins, realizou-se uma emenda com recurso a réguas aparafusadas. Dada a complexidade da ligação, quer em termos de cálculo quer em termos de execução, poderá ser vantajoso estudar outras soluções, como a utilização de adesivos estruturais (15).
3. No dimensionamento dos vidros duplos assumiu-se que a carga que actuava perpendicularmente ao plano se redistribuía pelos diversos vidros proporcionalmente à rigidez, ou seja à espessura do vido. Seria pertinente investigar sobre a veracidade desta hipótese e qual a influencia no estado de tensão do vidro em função do tipo de gás introduzido na caixa-de-ar, bem como a pressão com que é introduzido.

4. A última sugestão prende-se com questões económicas. Sendo as fachadas suportadas por *glass fins* habitualmente uma solução substancialmente mais dispendiosa que as fachadas normais, seria útil avaliar essas diferenças em termos de custo por metro quadrado bem como o peso dos restantes materiais no custo final, nomeadamente os materiais poliméricos utilizados na colagem dos vidros, estudando se possível alternativas mais acessíveis.

6 – Bibliografia

1. Architecture and interior design. [Online] [Cited: 12 31, 2012.] http://architectureandinteriordesigns.blogspot.pt.

2. Eckersley O'Callaghan. [Online] [Cited: 12 31, 2012.] www.eckersleyocallaghan.com/.

3. Mark's Structural Glass Home Page. [Online] [Cited: 12 31, 2012.] http://www-civil.eng.ox.ac.uk.

4. **Haldimann, Mathias, Luible, Andreas and Overend, Mauro.** *Structural Use of Glass.* s.l. : International Association for Bridge and Structural Engineering, 2008.

5. **Overend, M.** *Recent developments in design methods for glass structures.* Cambridge : s.n., 2009.

6. **Stephen J. Bennison, Maria HX Qin and Phillip S. Davies.** *High Performance laminated glass for structural efficient glazing.* 2008.

7. *Technical Bulletin : Strength characteristics and post-glass breakage performance.* s.l. : Dupont, 2008.

8. **Chan, S. L.** *Basic structural design considerations and properties of glass and aluminum structures.* s.l. : Department of Civil and Structural Engineering, Hong Kong Polytechnic University, 2002.

9. **Bennison, Stephen J.** *Designing the Grand Canyon's new laminated glass walkway.* 2007.

10. **Dow Corning.** *Manual Técnico.* 2009.

11. **LNEC.** *Coeficiente de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edificios.* 2006.

12. **Rodrigues, António Moret.** *Acústica,Aulas Teóricas, Fisica das Construções, IST.* 2009.

13. *Manual do Vidro.* s.l. : Saint Gobain Glass, 2008.

14. *"Sparkling future for fire resistant glass".* **Wood, Mike.** Fire Resistant Glass, s.l. : FSE, 2004.

15. **Christian Louter, Linda Schetters, Fred Veer.** *Experimental Research on Scale 1:8 Models of an Reinforced Glass Beam.* s.l. : Delf University of Technology.

16. *EN 12150-1-Thermally toughened soda lime silicate safety glass - Definition and description.*

17. **Richard A. Behr, The Pennsylvania State University.** *Architectural Glass for Earthquake-resistan Buildings.* 2001.

18. **Peter Robert Cromptom, University of Oxford.** *Assessmentof design procedures for structural glass beams.* 1999.

19. **Valarinho, Luis.** *Comportamento estrutural de vigas mistas vidro-GFRP.* Lisboa : IST, 2010.

20. **Rodrigues, António Moret.** *Térmica de Edificios, Aulas Teóricas, Fisica das Construções.* s.l. : IST, 2011.

21. **Martins, João Guerra and Pinto, Emanuel Lopes.** *Vidros - Disciplina de Materias de Construção I.* 2004.

22. *A finite element model for impact simulation with laminated glass.* **M. Timmel, S. Kolling, P. Osterrieder, P. A. Du Bois.** s.l. : Internation Journal of impact Engineering, 2007.

23. **Katherine K. Leitch, MIT.** *Structural Glass Technology: Systems and applications.* 2004.

24. **Gomes, Augusto and Pinto, A. P. Ferreira.** *Vidro, Apontamentos Aulas Teóricas, Materiais de Construção I, IST.* 2009.

25. —. *Polimeros, Apontamentos das aulas teóricas, Materiais de Construção I, IST.* 2009.

26. **Dinar Camotim, Cilmar Basaglia, Nuno Silvestre.** *Apontamentos de Estruturas Metálicas.* Lisboa : s.n., 2010.

27. *Glass panel under in-plane shear loading: Experimental investigation on structural panel point support.* **Danijel Mocibob, Michel Crisinel.** Lausanne : Ecole plytechnique fédérale de Lausanne EOFL, Steel Structures Laboratory ICOM, 2007.

28. **Cruz, João Sérgio.** *Relatório do estudo dos diversos elementos da fachada em painéis de vidro duplo apoiados em glass-fins para o edíficio da Fundação Champalimaud.* 2011.

29. **The institution of Structural Engineers.** *Structural use of glass in buildings.* 1999.

30. **European Organisation for Technical Approvals.** *Structural Sealant Glazing Systems.* 2001.

31. **Canada + Associates, Architecture.** *Smart Glass.* 2011.

32. Pilkington. *http://www.pilkington.com/.* [Online]

33. *NP EN 1991-1-2 - Acções em estruturas expostas ao fogo.* 2010.

34. *NF DTU 39 P5 - Travaux de bâtiment, Travaux de vitrerie-miroiterie, Partie 5: Mémento Sécurité.* 2006.

35. *NF DTU 39 P4 - Travaux de Bâtiment, Travaux de vitrerie-miroiterie, Partie 4: Mémento calculs pour le dimensionnement des vitrages.* 2006.

36. *NF DTU 39 P3 - Travaux de bâtiment - Travaux de vitrerie-miroiterie, Partie 3: Mémento calculs des contraintes thermiques.* 2006.

37. **Hilti.** *Hilti HIT-HY 70 for structural glass.*

38. **Favero & Milan Ingegneria, Mirano, Italy.** *Glass walkway in the Basilica of Aquileia, Italy.* s.l. : The European Stainless Steel Development Association, 2005.

39. *BS EN12150-2- Glass in building —Thermally toughened soda lime silicate safety glass - Evaluation of conformity.* 2000.

40. *BS EN12150-1- Glass in building —Thermally toughened soda lime silicate safety glass - Definition and description.* 2000.

41. *BS EN ISO 12543-5-Glass in Building - Laminated glass and laminated safety glass - Dimensions and edge finishing.*

42. *BS EN ISO 12543-2- Glass in Building - Laminated glass and laminated safety glass - Laminated safety glass.* 1998.

43. *BS EN 1863 - 2 - Glass in Buildings - Heat strengthened soda lime silicate glass - Evaluation of conformity.* 2004.

44. *BS EN 1863 - 1 - Glass in Buildings - Heat strengthened soda lime silicate glass.* 2000.

45. *BS EN 12600 - Glass in Building - Pendulum test - Impact test metho and classification for flat glass .* 2002.

46. *ASTM E 1300 - 09a Standard Practice of Determining Load Resistance of Glass in Buildings.* s.l. : 2009.

47. **Vidrado.** http://www.vidrado.com/. [Online] 2012.

48. *The Apple Stores: "A progression of structural strength in stair/balustrade ensembles made of laminated glass.".* **DuPont.** s.l. : DuPont Laminated Glass News, 2006.

49. *ASTM E2751-11: Standard Practice for Design and Performance of supported Glass Walkways.* 2011.

50. UK glass products. [Online] 2012.

51. *IQGlass.* [Online] [Cited: 12 30, 2012.] www.iqglassuk.com.

52. Diapo. [Online] [Cited: 12 30, 2012.] http://diapo.co.uk.

53. Clear Glass Solutions. [Online] [Cited: 12 31, 2012.] http://www.clearglass.com.au.

54. Smart Planet. [Online] [Cited: 12 31, 2012.] http://www.smartplanet.com.

ANEXOS

Anexo I – Justificação do valor adoptado para a pressão do vento – EN1991-1-4

A pressão exercida pelo vento nas superfícies exteriores, w_e, é dada por:

$$w_e = q_p(z_e).c_{pe} \quad \textbf{Eq. 40}$$

em que:

$q_p(z_e)$ - pressão dinâmica de pico

z_e – altura de referencia para a pressão exterior

c_{pe} – coeficiente de pressão exterior

A pressão exercida pelo vento nas superfícies interiores, w_i , é dada por:

$$w_i = q_p(z_i).c_{pi} \quad \textbf{Eq. 41}$$

em que:

$q_p(z_i)$ - pressão dinâmica de pico

z_i – altura de referencia para a pressão interior

c_{pi} – coeficiente de pressão interior

A pressão dinâmica de pico é:

$$q_p(z) = c_e(z).q_b = \frac{1}{2}..v_b^2.c_e(z) \quad \textbf{Eq. 42}$$

em que:

ρ – Massa volúmica do ar (admite-se 1,25kg/m³)

v_b- Velocidade de referência do vento, admite-se igual a 30 m/s (zona B)

$c_e(z)$ - Coeficiente de exposição , igual a 2.6 para z=15m. (Categoria de terreno II).

Pelo que:

$$q_p(15) = \frac{1}{2} * 1{,}25 * 30^2 * 2{,}6 \approx 1463\ Pa$$

O eurocódigo estabelece como coeficiente de pressão exterior para paredes exteriores verticais do lado de barlavento (D), com uma relação de h/d <0,25 o valor de +0,7 (sinal positivo indica pressão, enquanto o sinal negativo indica sucção). A mesma norma estabelece que caso não seja possível

determinar o coeficiente de pressão interior deve-se considerar o caso mais gravoso de entre +0,2 e -0,3.

Tem-se então como caso mais gravoso, pressão no exterior e sucção no interior, resultando assim um coeficiente de pressão total,

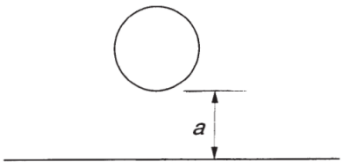
$$c_{pT} = c_{pe} + c_{pi} = 1{,}0 \qquad \textbf{Eq. 43}$$

pelo que,

$$W_k = 1{,}0x1463 = 1463\ Pa$$

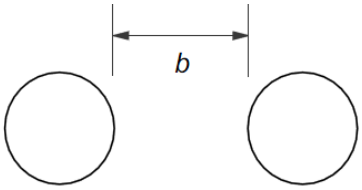
Anexo II – Normas para a geometria dos furos em vidros temperados e termoendurecidos.

A execução de furos em vidros temperados e vidros termoendurecidos tem de respeitar o exposto nas normas EN12150-1 e a EN1863-1 respectivamente. Aqui resume-se os pontos principais.



$a \geq 2d$

Figura A 1 - Distância mínima do furo ao bordo.



$b \geq 2d$

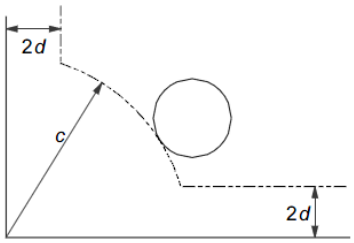
Figura A 2 - Distância mínima entre furos.

a – distancia do furo ao bordo

b – distancia entre dois furos

c – distancia do furo ao canto do painel

d – espessura do painel



$c \geq 6d$

Figura A 3 - Distância minima de um furo a um canto.

Tabela A 1 - Tolerâncias adimensionais

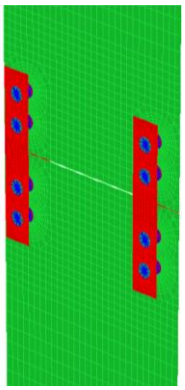
Nominal hole diameter, ∅	Tolerances
$4 \leq \varnothing \leq 20$	± 1,0
$20 < \varnothing \leq 100$	± 2,0
$100 < \varnothing$	consult the manufacturer

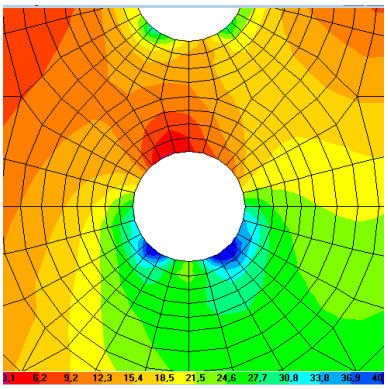
Anexo III – *Glass fin* – Resultados computacionais

Figura A 4 - *Glass fin* - Modelo SAP.

Tensão máxima / número de parafusos

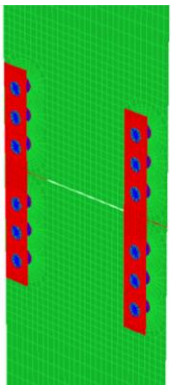
Figura A 5 - Modelo I

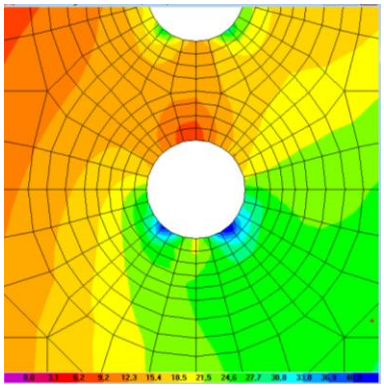




$$\sigma_{max} = 52{,}4\ MPa$$

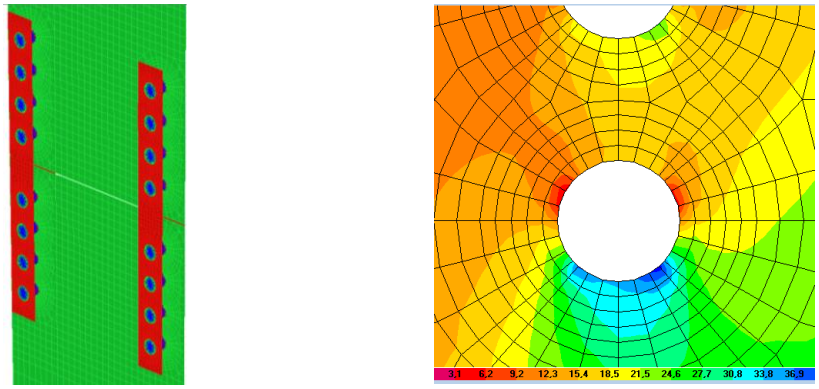
Figura A 6 - Modelo II





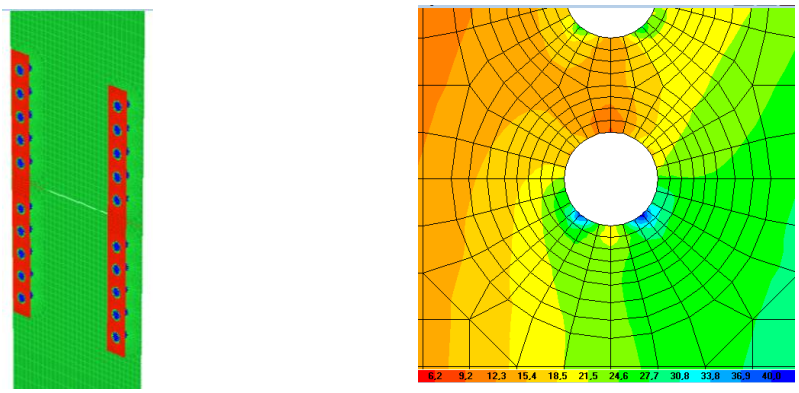
$$\sigma_{max} = 45{,}9\ MPa$$

Figura A 7 - Modelo III



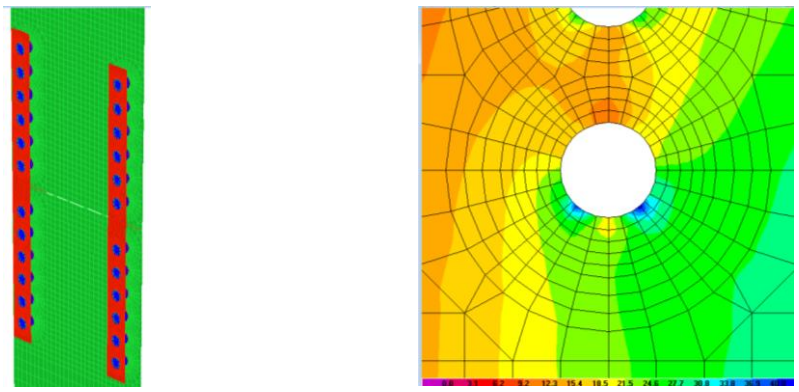
$$\sigma_{max} = 41{,}8\ MPa$$

Figura A 8 - Modelo IV



$$\sigma_{max} = 42{,}6\ MPa$$

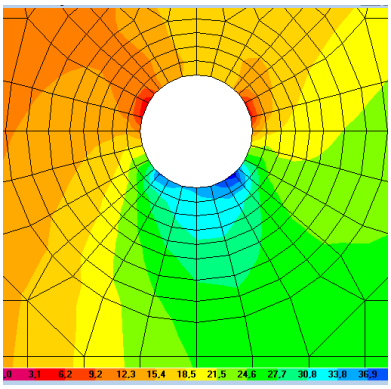
Figura A 9 - Modelo V



$$\sigma_{max} = 42{,}7 MPa$$

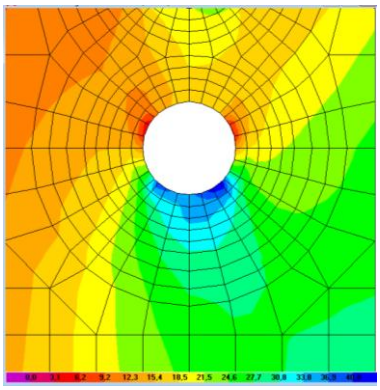
Zona da emenda (modelo III)

Figura A 10 – 11m + 4m



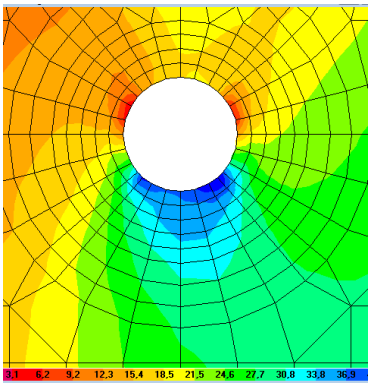
$\sigma_{max} = 42{,}6\ MPa$

Figura A 11 - 10,6m + 4,4m



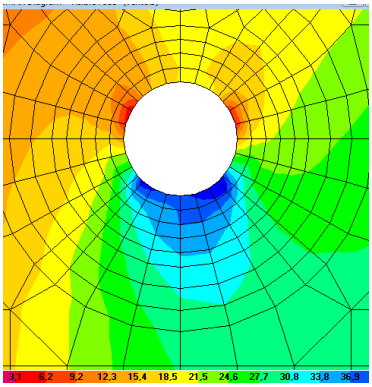
$\sigma_{max} = 44{,}7\ MPa$

Figura A 12 - 10,2m + 4,8m



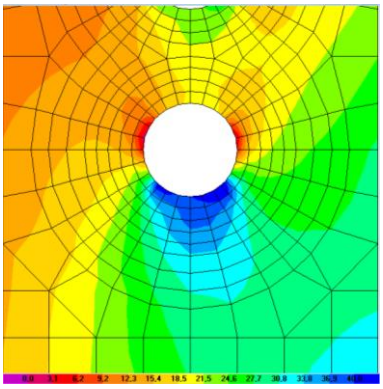
$\sigma_{max} = 46{,}5\ MPa$

Figura A 13 - 9,8m + 5,2m



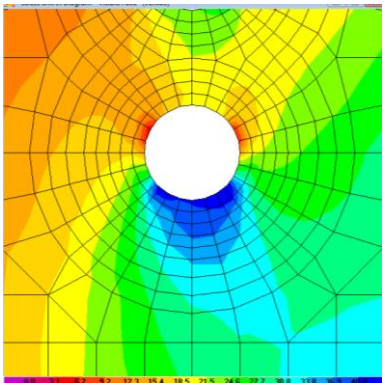
$\sigma_{max} = 47{,}9\ MPa$

Figura A 14 - 9,4m + 5,6m



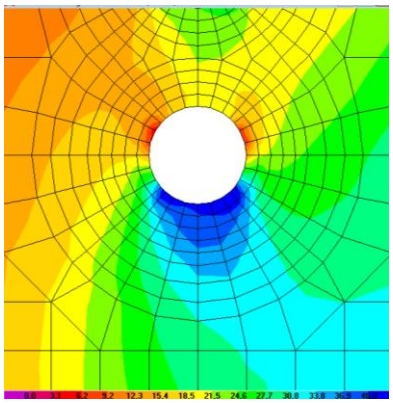
$\sigma_{max} = 49{,}2\ MPa$

Figura A 15 - 9m + 6m



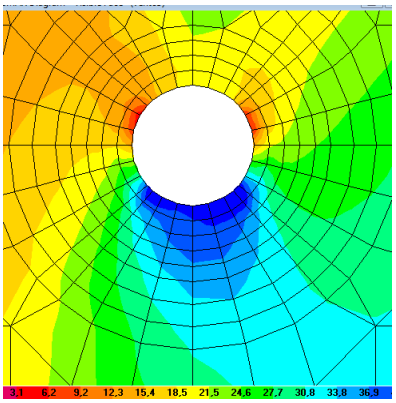
$\sigma_{max} = 50{,}1\ MPa$

Figura A 16 - 8,6m + 6,4m



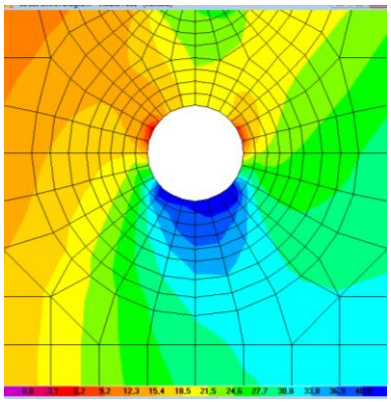
$\sigma_{max} = 50{,}7\ MPa$

Figura A 17 - 8,2m + 6,8m



$\sigma_{max} = 51{,}1\ MPa$

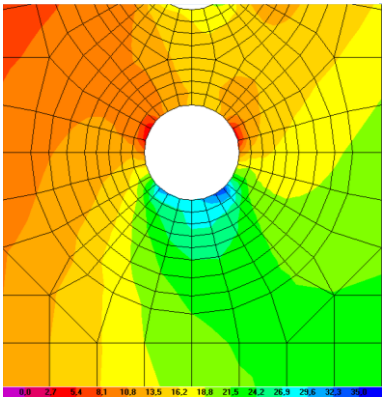
Figura A 18 - 7,5m + 7,5m



$\sigma_{max} = 51{,}1\ MPa$

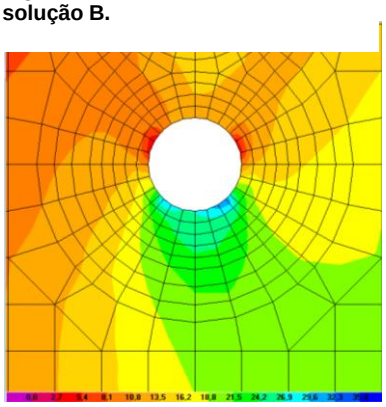
Afastamento entre glass fins

Figura A 19 - Tensão máxima, solução A.



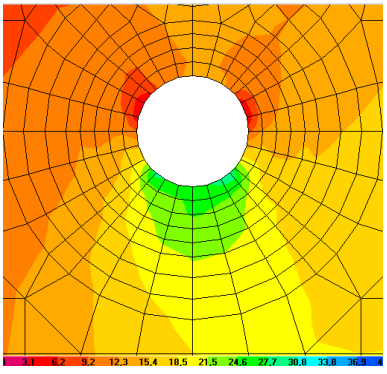
$\sigma_{max} = 34{,}8\ MPa$

Figura A 20 - Tensão máxima, solução B.



$\sigma_{max} = 32{,}5\ MPa$

Figura A 21 - Tensão máxima, solução C.



$\sigma_{max} = 30{,}5\ MPa$

Para simular a interacção do parafuso com a *glass fin* e com as chapas de aço recorreu-se a barras rígidas rotuladas, unindo o parafuso aos nós dos elementos dos bordos de furação, transmitindo unicamente esforços de compressão (Figura A 22).

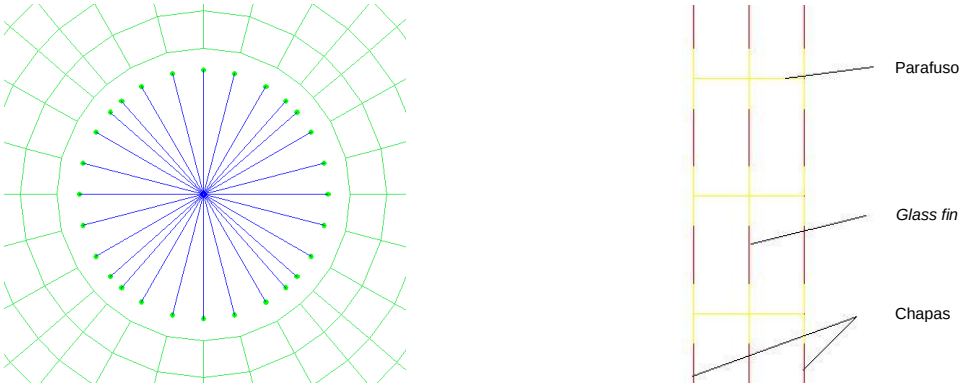


Figura A 22 - Ligação do parafuso à glass fin - Modelo SAP

Anexo IV – Painel de fachada, resultados MEPLA

$$\xi = \frac{|v_{SAP} - v_{MEPLA}|}{v_{MEPLA}} \qquad \textbf{Eq. 44}$$

Tabela A 2 – Resultados MEPLA para a solução A.

ANÁLISE DO PAINEL 2,5X1,2						
h_1[mm]	h_2[mm]	h_3[mm]	σ_m[MPa]	σ_L [MPa]	ξ_{σ_m}	ξ_{σ_L}
6	8	8	14	27,2	2,2%	11,5%
8	10	10	10,5	18,2	4,7%	10,6%
10	12	12	8,2	13	9,1%	9,0%
12	15	15	5,6	8,9	11,7%	7,4%
15	19	19	3,8	5,9	15,2%	4,9%

Tabela A 3 - Resultados MEPLA para a solução B.

ANÁLISE DO PAINEL 3,0X1,2						
h_1[mm]	h_2[mm]	h_3[mm]	σ_m[MPa]	σ_L [MPa]	ξ_{σ_m}	ξ_{σ_L}
6	8	8	17,7	37,1	11,3%	17,8%
8	10	10	13,3	24,8	8,3%	16,9%
10	12	12	10,4	17,8	3,2%	14,6%
12	15	15	7,1	12,1	0,3%	13,8%
15	19	19	4,8	8	3,3%	11,4%

Tabela A 4 - Resultados MEPLA para a solução C.

ANÁLISE DO PAINEL 3,5X1,2						
h_1[mm]	h_2[mm]	h_3[mm]	σ_m[MPa]	σ_L [MPa]	ξ_{σ_m}	ξ_{σ_L}
6	8	8	22	48,7	21,9%	22,1%
8	10	10	16,5	32,5	18,8%	21,4%
10	12	12	12,8	23,3	14,2%	19,2%
12	15	15	8,7	15,8	11,4%	18,6%
15	19	19	5,9	10,4	7,1%	16,7%

Anexo V – Pavimentos

Resultados ASTM E 2751 -11 / SAP2000

Tabela A 5 - Resultados SAP para $L_{p2} = 750\ mm$.

$L_{p2} = 750\ mm$						
Tipologia / L_{p1} (mm)	**1500**		**2000**		**2500**	
	σ_{max}	δ_{max}	σ_{max}	δ_{max}	σ_{max}	δ_{max}
3x8	16,1	2,6	16,4	3	16,5	3,2
3x10	10,4	1,4	10,6	1,6	10,7	1,7
3x12	7,3	0,79	7,5	0,9	7,9	1
3x15	4,8	0,4	4,7	0,5	5	0,5

Tabela A 6 - Resultados SAP para $L_{p2} = 1250\ mm$.

$L_{p2} = 1250\ mm$						
Tipologia / L_{p1} (mm)	**1500**		**2000**		**2500**	
	σ_{max}	δ_{max}	σ_{max}	δ_{max}	σ_{max}	δ_{max}
3x8	22,6	11,2	31,6	16,5	37,6	20,1
3x10	14,6	5,8	20,5	8,5	24,4	10,4
3x12	10,3	3,4	14,5	5	17,2	6,1
3x15	6,8	1,8	9,5	2,7	11,3	3,2

Resultados MEPLA

Tabela A 7 - Resultados MEPLA para $L_{p2} = 750\ mm$.

$L_{p2} = 750\ mm$						
Tipologia / L_{p1} (mm)	**1500**		**2000**		**2500**	
	σ_{max}	δ_{max}	σ_{max}	δ_{max}	σ_{max}	δ_{max}
3x8	15,1	2,6	15,4	3	16,1	3,2
3x10	9,8	1,4	10	1,6	10,6	1,7
3x12	6,9	0,8	7,1	0,9	7,5	1
3x15	4,6	0,4	4,7	0,5	4,9	0,5

Tabela A 8 - Resultados MEPLA para $L_{p2} = 1250\ mm$.

$L_{p2} = 1250\ mm$						
Tipologia / L_{p1} (mm)	**1500**		**2000**		**2500**	
	σ_{max}	δ_{max}	σ_{max}	δ_{max}	σ_{max}	δ_{max}
3x8	22,3	11,1	31,2	16,2	37,1	19,7
3x10	14,6	5,8	20,4	8,5	24,3	10,3
3x12	10,4	3,4	14,5	5	17,2	6,12
3x15	6,9	1,8	9,6	2,7	11,4	3,2

Erros relativos SJ MEPLA /SAP

Tabela A 9 - Erros relativos para $L_{p2} = 750\ mm$.

Tipologia / L_{p1} (mm)	$L_{p2} = 750\ mm$					
	1500		2000		2500	
	ξ_σ	ξ_δ	ξ_σ	ξ_δ	ξ_σ	ξ_δ
3x8	7%	0%	6%	0%	2%	0%
3x10	6%	0%	6%	0%	1%	0%
3x12	6%	1%	6%	0%	5%	0%
3x15	4%	0%	0%	0%	2%	0%

Tabela A 10 - Erros relativos para $L_{p2} = 1250\ mm$.

Tipologia / L_{p1} (mm)	$L_{p2} = 1250\ mm$					
	1500		2000		2500	
	ξ_σ	ξ_δ	ξ_σ	ξ_δ	ξ_σ	ξ_δ
3x8	1%	1%	1%	2%	1%	2%
3x10	0%	0%	0%	0%	0%	1%
3x12	1%	0%	0%	0%	0%	0%
3x15	1%	0%	1%	0%	1%	0%

Anexo VI – Fichas técnicas de materiais

Ficha de Produto
Versão 11 / 2006

Industry

Sikasil® SG-500

Silicone Estrutural Bi-componente de Elevada Performance

Dados técnicos do produto

Propriedades		Componente A Sikasil® SG-500 A	Componente B Sikasil® SG-500 B
Base Química		Silicone 2-C	
Cor (CQP[1] 001-1)		Branco	Preto
Cor - mistura		Preto	
Mecanismo cura		Policondensação	
Tipo cura		Neutra	
Densidade (CQP 006-4)		1.4 kg/l aprox.	1.1 kg/l aprox.
Densidade mistura		1.37 kg/l aprox.	
Rácio mistura	A:B em volume A:B em peso	10:1 13:1	
Viscosidade (CQP 029-5)		1'100 Pa·s aprox.	150 Pa·s aprox.
Consistência		Pastoso	
Temperatura aplicação		5 a 40 °C (41 – 104 °F)	
Tempo abertura[2] (CQP 536-3)		60 min aprox.	
Ausência pegajosidade[2] (CQP 019-1)		240 min aprox.	
Dureza Shore A (CQP 023-1 / ISO 868)		45 aprox.	
Resistência à tracção (CQP 036-1 / ISO 37)		2.2 N/mm² aprox.	
Alongamento à ruptura (CQP 036-1 / ISO 37)		300 % aprox.	
Resistência à cont. do arrancamento (CQP 045-1 / ISO 34)		6 N/mm aprox.	
Módulo 100 % (CQP 036-1 / ISO 37)		1.1 N/mm² aprox.	
Módulo 12.5 %[3] (CQP 036-1 / ISO 37)		0.3 N/mm² aprox.	
Capacidade de acomodação ao movimento (ASTM C 719)		± 12.5 %	
Permeabilidade ao vapor de água (EN 1279-4)		~ 19 g H_2O / m²·24 h·2 mm	
Resistência térmica (CQP 513-1) Curto prazo	longo prazo 4 h 1 h	~ 180 °C (356 °F) ~ 200 °C (392 °F) ~ 220 °C (428 °F)	
Temperatura serviço		~ -40 a +150 °C (~ -40 a +302 °F)	
Tempo armazenagem (abaixo 25 °C) (CQP 016-1)		12 meses	

[1] CQP = Procedimento Qualidade SIKA [2] 23 °C (73 °F) / 50% H.R.. [3] Para valores adicionais – Ver Folha de Cálculo de valores

Descrição

O Sikasil® SG-500 é um silicone estrutural bi-componente, alto módulo, de cura neutra.
O Sikasil® SG-500 é fabricado de acordo com as normas de qualidade ISO 9001 e de acordo com o programa de actuação responsável.

Vantagens

- Resistente aos raios UV e ao envelhecimento
- Retardante fogo (EN 11925-2 / DIN 4102-B1)
- Cumpre com os requisitos das normas EOTA ETAG 002, EN 13022 e ASTM C 1184
- Marcação CE, European Technical Approval (ETA)
- Reconhecido por SNJF e Vi-VEC

Campos de Aplicação

O Sikasil® SG-500 é particularmente indicado em colagem estrutural de vidro, colagem de painéis solares e outras aplicações de elevada exigência.
Este produto é adequado para uso apenas por profissionais experientes. Devem ser efectuados testes de aderência com substratos e condições actuais para assegurar compatibilidade.

Sikasil® SG-500 1/1

Mecanismo de cura
O Sikasil® SG-500 inicia a cura imediatamente após a mistura dos dois componentes.
A velocidade de cura depende principalmente da temperatura: quando maior esta for mais rápido se desenvolve o processo de cura.
Aquecimento acima de 50ºC não é aconselhado por poder originar formação de bolhas.
De notar que – especialmente quando são usados misturadores estáticos – o tempo de abertura da mistura, isto é, o tempo que o material pode permanecer no misturador sem obstruir o mesmo é significativamente mais baixo do que o tempo de abertura indicado nos dados técnicos do produto. Para mais informações por favor contactar os serviços técnicos da Sika, Divisão Industria.

Limites de Aplicação
Todos os Sikasil® WS, FS, SG, IG, WT e outros selantes e adesivos base silicone são compatíveis entre eles. Os selantes Sikasil® WS e FS são compatíveis com os selantes Sika® Glaze IG. Todos os outros selantes requerem aprovação da SIKA antes do uso dos mesmos em combinação com o Sikasil® SG-500. Onde dois ou mais selantes forem usados, deve-se assegurar da cura completa do selante anterior antes da aplicação do próximo.
Os adesivos e selantes Sikasil® SG, IG e WT só devem ser aplicados em colagem estrutural ou de janelas, por profissionais experientes e após exame detalhado e aprovação escrita dos detalhes do projecto correspondente pelo departamento técnico da Sika, Divisão Industria.
A compatibilidade de fundos de junta e outros acessórios com o Sikasil® SG-500 deve ser testada antecipadamente.
A informação acima é dada apenas como orientação geral. Conselhos sobre aplicações específicas serão dados a pedido.

Método de Aplicação
Preparação de superfície
As superfícies devem estar limpas, secas e sem vestígios de gorduras, óleos ou poeiras.
Para aconselhamento sobre aplicações específicas por favor contactar os serviços técnicos da Sika, Divisão Indústria.

Aplicação
Antes da aplicação do Sikasil® SG-500 ambos os componentes devem estar misturados homogeneamente e isentos de bolhas de ar, no rácio indicado anteriormente, com uma tolerância de ±10%. A maior parte dos equipamentos de medição/mistura comercializados são adequados para aplicação deste produto. Por favor contactar o System Engineering da Sika – Divisão Indústria para aconselhamento específico.
Enquanto o componente A do Sikasil® SG-500 é estável ao ar, o componente B é sensível à humidade e deve ser exposto apenas durante o período de tempo estritamente necessário.
As juntas devem estar devidamente dimensionadas pelo facto de não serem possíveis alterações após construção das mesmas. A base de cálculo para as dimensões necessárias da junta são valores técnicos do adesivo e dos materiais de construção adjacentes, exposição dos materiais, a sua construção e tamanho assim como cargas externas.
Para mais informações por favor contactar os serviços técnicos da Sika - Divisão Industria.

Maquinagem e acabamento
Devem ser efectuadas durante o tempo de abertura do produto.

Remoção
O Sikasil® SG-500 pode ser removido das ferramentas e equipamentos com Sika® Remover-208. Os misturadores estáticos do equipamento de medição/mistura podem ser limpos com Sikasil® Mixer Cleaner.
As mãos e a pele expostas têm de ser lavadas de imediato usando Sika® Top Clean T ou um agente de limpeza industrial e água. Não usar solventes!

Pintura sobre o produto
O Sikasil® SG-500 não pode ser pintado.

Outras informações
Cópias das seguintes publicações estão disponíveis quando pedidas:
- Ficha de Segurança

Embalagem

Comp. A: Tambor	260 Kg
Comp. B: Balde	20 Kg

Valores base
Todos os valores apresentados nesta ficha de produto são baseados em testes de laboratório. Valores obtidos podem variar devido a circunstâncias fora do nosso controlo.

Informação Higiene e Segurança
Para informações e aconselhamento sobre segurança no manuseamento, armazenamento e disposição dos produtos químicos, os utilizadores devem ter em conta as folhas de segurança que contêm dados, relativos a segurança, físicos, ecológicos, toxicológicos e outros.

Informação Legal
A informação e em particular as recomendações relacionadas com aplicação e utilização final dos produtos Sika, são fornecidas em boa fé e baseadas no conhecimento e experiência dos produtos sempre que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais, de acordo com as recomendações da Sika. Na prática, as diferenças no estado dos materiais, das superfícies, e das condições de aplicação em obra, são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão para um fim em particular, nem qualquer responsabilidade decorrente de qualquer relacionamento legal, poderão ser inferidas desta informação, ou de qualquer recomendação por escrito, ou de qualquer outra recomendação dada. O produto deve ser ensaiado para aferir a adequabilidade do mesmo à aplicação e fins pretendidos. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceites estão sujeitas às nossas condições de venda e de entrega vigentes. Os utilizadores deverão sempre consultar a versão mais recente da nossa Ficha de Produto específica do produto a que diz respeito, que será entregue sempre que pedida.

Informação adicional disponível em:
www.sika.pt
www.sika.com

Sika Portugal SA
Divisão Industria
Rua Santarem, 113
4400-292 V.N.Gaia
Portugal
Tel. +351 22 377 63 00
Fax +351 22 370 20 12

Informação de Produto

Selantes de Silicone

DOW CORNING

Dow Corning® 995 Selante de Silicone para Envidraçamento Estrutural

Selante de máxima resistência à tração, ideal para colagem estrutural e aplicações de envidraçamento em vidro de segurança

CARACTERÍSTICAS

- Inodoro e sistema de cura não corrosivo
- Cura formando uma borracha elastomérica extremamente forte, assegurando uma vedação impermeável, durável e flexível

BENEFÍCIOS

- Excelente resistência às intempéries e alta resistência à radiação ultravioleta, calor e umidade, ozônio e temperaturas extremas
- Excelentes propriedades mecânicas
- Testes aprovados para aplicações de envidraçamento em vidros de segurança
- Excelente adesão sem primer a uma grande variedade de substratos, incluindo vidros esmaltado, revestido e refletivo, alumínio anodizado e alumínio pintado com pintura a base de poliéster ou alumínio pintado com diversas tintas à base de flúor-polímero, como a tinta *Kynar*®[1]
- Atende aos padrões globais para colagem estrutural (América, China e Europa)

COMPOSIÇÃO

- Selante elastomérico de cura neutra monocomponente

[1]*Kynar* é marca comercial da Atofina Chemicals Inc.

APLICAÇÕES

- Silicone para envidraçamento estrutural e aplicações em vidro de segurança

PROPRIEDADES TÍPICAS

Aos elaboradores de especificações: Favor contatar o seu Engenheiro de Aplicação e Vendas local da Dow Corning ou o Serviço de Atendimento ao Cliente da Dow Corning antes de determinar as especificações com este produto.

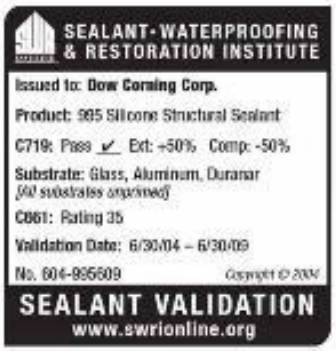
Teste	Propriedade	Unidade	Valor
Como fornecido			
	Cor		Preto, branco e cinza
MIL-S-8802	Tempo Livre de Pegajosidade, 50% UR	minutos	65
	Tempo de Cura a 25°C (77°F) e 50% UR	dias	7-14
	Adesão Total	dias	14-21
	Escoamento	mm	0.1
	Tempo de Manipulação	minutos	10-20
	Densidade		1.339
	Conteúdo VOC[1]	g/L	30
Como Curado – Após 7 dias a 25°C (77°F), 50% UR			
ASTM[2] D2240	Dureza, Shore A	pontos	40
ASTM D0412	Máxima Resistência à Tração	psi (MPa)	350 (2.41)
	Alongamento Máximo	%	525
ASTM D0624	Resistência à Ruptura– die B	ppi	49
ASTM D0794	Resistência da Película	ppi	40
Como Curado – Após 21 dias a 25°C (77°F), 50% UR			
ASTM C1135	Tensão a 25% de Alongamento	psi (MPa)	48 (0.33)
	Tensão a 50% de Alongamento	psi (MPa)	75 (0.51)
ASTM C719	Capacidade de Movimentação da Junta	%	±50
Como Curado – Após de 21 dias a 25°C (77°F), 50% UR e submetido a 4,500 horas na CUV ASTM G-53			
ASTM C 1135	Tensão a 25% de Alongamento	psi (MPa)	50 (0.34)
	Tensão a 50% de Alongamento	psi (MPa)	78 (0.53)

[1]Baseado no gerenciamento da Qualidade do ar da Costa Sul do Distrito da Califórnia, o máximo VOC é mostrado com e sem água e isento de compostos. Para a folha técnica do VOC de uma cor específica de selante, por favor envie sua solicitação para product inquiry@dowcorning.com.
[2]ASTM: Sociedade Americana de Testes e Materiais (*American Society for Testing and Materials*)

DESCRIÇÃO

Dow Corning 995 Selante de Silicone para Envidraçamento Estrutural é um selante de silicone monocomponente de cura neutra, especialmente projetado para aplicações de selagem estrutural em vidro e metal, em fábricas ou em obras.

O índice de cura da superfície e a cura na profundidade da maioria dos selantes de silicone monocomponente RTV é afetado pela temperatura e pela umidade do meio ambiente. Entretanto, um ambiente com altas temperaturas em combinação com alta umidade pode diminuir o tempo de cura da



superfície do *Dow Corning* 995 Selante de Silicone para Envidraçamento Estrutural.

CORES

Este produto está disponível nas cores: preto, cinza e branco. Por favor, contate o Engenheiro de Aplicações e Vendas local da Dow Corning para saber qual a disponibilidade de cores na sua região.

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICA E PADRÕES

Dow Corning 995 Selante de Silicone para Envidraçamento Estrutural foi internamente testado e projetado para atender ou superar as exigências:

- Especificação Federal TT-S-001543A (COM-NBS) Classe A para selante de silicone para construção
- Especificação Federal TT-S-00230C (COM-NSB) Classe A para selante monocomponente para construção
- Especificação ASTM C-920 Tipo S, Grau NS, Classe 50, Uso NT, G e A
- Especificação Padrão ASTM C1184 para selante de silicone estrutural
- Especificação Chinesa GB 16776 para envidraçamento estrutural
- SNJF VEC

Dow Corning 995 Selante de Silicone para Envidraçamento Estrutural apresenta propriedades físicas e desempenho adesivo de alto nível, conservados mesmo depois do envelhecimento, como detalhado nos Padrões Europeus EOTA ETAG 002 e prEN 13022.

UTILIZAÇÃO

Por favor consulte o Manual Técnico das Américas, Catálogo No. 62-1112, para desenho completo, método de aplicação e desenho da junta. O Engenheiro de Aplicação e Vendas local da Dow Corning pode fornecer recomendações específicas.

Preparação

Limpar todas as juntas removendo toda a sujeira e contaminantes, como gordura, óleo, pó, água, gelo, poeira superficial, selantes antigos ou componentes de selagem e revestimentos protetores.

Método de aplicação

Instalar o corpo de apoio de polietileno expandido ou a fita na junta. As áreas adjacentes às juntas podem ser protegidas com fita adesiva para obtenção de um melhor acabamento. Geralmente não é necessário o uso de Primer em superfícies não-porosas, porém pode ser necessário para melhorar a selagem em alguns substratos porosos. A Dow Corning recomenda que seja feito um teste de adesão em um corpo de prova antes da aplicação total.

Aplicar o *Dow Corning* 995 Selante de Silicone para Envidraçamento Estrutural pressionando-o de maneira contínua (o selante pode ser aplicado com vários tipos de pistola a ar e a maioria das bombas para balde). Antes que uma película se forme (normalmente dentro de 10 minutos), espatular o selante com uma leve pressão para espalhar o mesmo contra o corpo de apoio e as superfícies da junta. Remover a fita adesiva logo após o espatulamento do produto.

PRECAUÇÕES DURANTE O MANUSEIO

NÃO ESTÃO INCLUÍDAS NESTE DOCUMENTO AS INFORMAÇÕES NECESSÁRIAS PARA A UTILIZAÇÃO SEGURA DO PRODUTO. ANTES DE MANUSEÁ-LO, LEIA A FOLHA DE DADOS DE SEGURANÇA DO PRODUTO E OS RÓTULOS DA EMBALAGEM SOBRE A SEGURANÇA NO MANUSEIO E SOBRE OS RISCOS FÍSICOS E À SAÚDE. ESTAS INFORMAÇÕES ESTÃO DISPONÍVEIS NO SITE DA DOW CORNING, EM WWW.DOWCORNING.COM, COM O ENGENHEIRO DE APLICAÇÕES E VENDAS LOCAL, OU DISTRIBUIDOR DA DOW CORNING, OU CONTATANDO O SERVIÇO DE ATENDIMENTO AO CLIENTE DA DOW CORNING.

VIDA ÚTIL E ARMAZENAMENTO

Quando armazenado a 30°C (86°F) ou abaixo, nas embalagens originais fechadas, este produto apresenta uma vida útil de 18 meses a partir da data de fabricação.

EMBALAGEM

Este produto está disponível em cartuchos descartáveis de 300 ml, baldes de 22 kg e tambores de 228.1 kg, dependendo do local de compra. Por favor, contate o Engenheiro de Aplicações e Vendas local da Dow Corning para saber qual a disponibilidade de embalagens na sua região.

Typical Physical Properties of DuPont™ SentryGlas® Interlayer

Property	Units Metric (English)	Value	ASTM Test
Young's Modulus	MPa (kpsi)	300 (43.5)	D5026
Tensile Strength	MPa (kpsi)	34.5 (5.0)	D638
Elongation	%	400	D638
Density	g/cm³ (lb/in³)	0.95 (0.0343)	D792
Flex Modulus 23°C (78°F)	MPa (kpsi)	345 (50)	D790
Heat Deflection Temperature at 0.46 MPa	°C (°F)	43 (110)	D648
Melting Point	°C (°F)	94 (201)	(DSC)
Coefficient of Thermal Expansion (–20°C to 32°C)	10^{-5} cm/cm °C (mil/in °C)	10–15 (0.10–0.15)	D696

Hilti HIT-HY 70 injectable mortar

Ordering designation	Contents (ml)	Includes	Item no.
Hilti HIT-HY 70/330/2	330	2 mixing nozzles	383677
Hilti HIT-HY 70/ 500/2	500	2 mixing nozzles	383681
Hilti HIT-HY 70/1400/1	1400	1 mixing nozzle	383685

Dispensers

Ordering designation	Item no.
Hilti MD 2000 manual dispenser	371291
Hilti MD 2500 manual dispenser	338853
Hilti ED 3500 cordless electric dispenser	273291
Hilti HIT-P 8000 D pneumatic dispenser for 1400 ml packs	373959

Technical data	Hilti HIT-HY 70
In-service temperature range	-40 °C to 120 °C
Application temperature range	-5 °C to 40 °C
Curing time	45 min at 20 °C
Mortar compressive strength	max. 65 N/mm², design value 31 N/mm²
Modulus of elasticity	1.750 N/mm²
Thermal coefficient of expansion	0.0034 % / °C
Resistance of cured mortar	UV-Light: OK Temperature: Up to 120°C Water: No effect on compressive strength of the mortar Resistant to cleaners containing tensides
Compatibility	No effect on PVD and EPDM foil or silicone materials